



**TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT**

# **GÉPSZERKEZETEK REZONANCIA VIZSGÁLATA REZGÉSMÉRÉSSSEL**

**Szerző:** **Plesz Tímea**  
gépészmérnök BSc. szak, IV. évf.

**Konzulens:** **Dr. Szabó József Zoltán**  
Intézetigazgató helyettes, egyetemi  
docens

**Budapest, 2013.**

## Tartalomjegyzék

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tartalomjegyzék.....                                                                      | 2  |
| Bevezetés.....                                                                            | 4  |
| 1. A rezonancia károsító hatásai.....                                                     | 5  |
| 1.1. A rezonancia jelensége.....                                                          | 5  |
| 1.2. A megengedhető rezgések.....                                                         | 6  |
| 1.3. Gépágyazás, mint rezgéstani probléma.....                                            | 8  |
| 2. A rezonancia kimutatásának módszerei .....                                             | 11 |
| 2.1. Spektrum és időjel analízis.....                                                     | 11 |
| 2.2. Kifutás vizsgálat.....                                                               | 14 |
| 2.3. Kalapácsütés, vagy „Bump” teszt .....                                                | 16 |
| 3. A rezonanciák vizsgálatára alkalmazott eszközök, műszerek, szoftverek és számítások .. | 18 |
| 3.1. VIBROTESTER próbapad bemutatása.....                                                 | 18 |
| 3.2. A MICROLOG rendszer ismertetése .....                                                | 20 |
| 3.3. Az Easy-Viber rendszer .....                                                         | 22 |
| 3.4. A rezonancia vizsgálatához alkalmazott számítás .....                                | 24 |
| 4. Rezonancia kimutatása rezgésspektrum és időjel analízissel.....                        | 25 |
| 4.1. A mérési körülmények .....                                                           | 25 |
| 4.2. A mérési eredmények bemutatása.....                                                  | 27 |
| 4.2.1. Spektrum analízis:.....                                                            | 27 |
| 4.2.2. Time-Waveform (időjel alak) analízis: .....                                        | 30 |
| 4.2.3. Fázisszög változásának elemzése.....                                               | 32 |
| 4.3. Megállapítások a mérési eredmények alapján.....                                      | 34 |
| 5. Rezonancia kimutatása kifutási vizsgálattal.....                                       | 36 |
| 5.1. A mérési körülmények .....                                                           | 36 |
| 5.2. A mérési eredmények bemutatása.....                                                  | 37 |
| 5.3. Megállapítások a mérési eredmények alapján.....                                      | 41 |
| 6. Rezonancia kimutatása kalapácsütéssel, vagyis „Bump” teszttel .....                    | 42 |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.1. A mérési körülmények .....                                        | 42 |
| 6.2. A mérési eredmények bemutatása.....                               | 43 |
| 6.3. Megállapítások a mérési eredmények alapján.....                   | 48 |
| 7. Következtetések a mérési eredmények, és a kiértékelés alapján ..... | 49 |
| 7.1. Következtetéses a rezgésspektrum és időjel analízis alapján.....  | 49 |
| 7.2. Következtetéses a kifutási vizsgálat alapján .....                | 50 |
| 7.3. Következtetések a „Bump” teszt alapján .....                      | 50 |
| Összefoglaló .....                                                     | 52 |
| Summary .....                                                          | 54 |
| KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....                                               | 56 |
| ACKNOWLEDGMENT .....                                                   | 56 |
| Irodalomjegyzék.....                                                   | 57 |
| Hivatkozásjegyzék .....                                                | 58 |
| Képtár .....                                                           | 58 |

## Bevezetés

A műszaki diagnosztika témakörébe sorolható eljárások és módszerek rendkívül sokrétűek. Ezek közül is az egyik legismertebb és a gyakorlatban is igen elterjedt, a rezgésdiagnosztika. A TDK dolgozat fő témája, rezgésdiagnosztikai mérések segítségével a gépszerkezetek üzemeltetése során fellépő kritikus rezonancia vizsgálata.

Napjainkban, az ipari életben hatalmas gazdasági jelentősége van a gépipai üzemfenntartásnak. A gyártás folyamatossága, a gépek állapotának megőrzése, a váratlan meghibásodások elkerülése és a termelés kiesések megelőzése kizárólag a megfelelő üzemfenntartással lehetséges. A leggyakrabban alkalmazott üzemfenntartási stratégia az állapotfüggő karbantartás, melynek elengedhetetlen része a rezgésdiagnosztika, hiszen rezgésvizsgálattal a gépszerkezetek beállítási és működési hibái üzem közben is kimutathatók. Ezen hibák felismerésével és megszüntetésével a gépek élettartalma jelentős mértékben meghosszabbítható.

A TDK dolgozatban elemzésre és bemutatásra kerülnek a gépszerkezetek rezonancia által okozott meghibásodási lehetőségei, valamint a különféle gépalapzatok rezonanciára gyakorolt hatásának vizsgálati módszerei.

A dolgozat célkitűzése, azon rezonancia kimutatására alkalmas rezgésdiagnosztikai mérési módszereknek összefoglaló ismertetése, melyek az iparban is sikeresen alkalmaznak. Ilyen módszer a spektrum és időjel analízis, a kifutás vizsgálat, és a kalapácsütés, vagy „bump” teszt is. Ezen módszerek elméleti bemutatása után a VIBROTESTER próbapadon valós körülmények között rezgésdiagnosztikai méréseken keresztül igazolom a módszerek ipari alkalmazhatóságát. Mind a három vizsgálati módszer esetében három különböző keménységgel rendelkező alapzaton végeztem méréseket.

A kísérletek során arra próbáltam választ kapni, hogy a vizsgált próbapadon, milyen frekvencia tartományban fedezhető fel a rezonancia jelensége és a jelenséget hogyan befolyásolja az alapozás. Remélem, hogy a dolgozatban sikerül rávilágítanom a korszerű karbantartási rendszerek, a rezgésdiagnosztikai mérőműszerek és mérési eljárások fontosságára. Munkám során törekedtem arra, hogy a mérések az egyetemen is felhasználhatóak legyenek, ezáltal hozzá járuljak a rezgésdiagnosztika oktatási színvonalának emeléséhez.

## 1. A rezonancia károsító hatásai

### 1.1. A rezonancia jelensége

A forgó gépek, gépszerkezetek és berendezések leggyakrabban előforduló mechanikai problémája többek közt a kiegyensúlyozatlanság, a rezonancia, a meglazult gépelemek vagy laza rögzítések, a görbe tengelyek vagy tengelykapcsoló hibák. A későbbiekben kizárólag a rezonancia jelenségével foglalkozok.

A forgó mozgást végző gépekben lehet, hogy csak kisebb mértékben, de folyamatosan jelen vannak az üzemszerű, természetes gerjesztések. Ha ennek a gerjesztésnek a frekvenciája hasonló vagy ugyanolyan mértékű, mint a gépszerkezet rezonanciafrekvenciája, akkor a gépelemekben a rezgés felerősödik, és a rezonancia jelensége tapasztalható, tehát a gép berezonál. Ilyenkor a rezgés lényesen magasabb szinten jelenik meg, mint mikor a gerjesztés frekvenciája és a rezonancia különbözik egymástól.

A forgótengely tömegétől és merevségétől függ a forgótengely kritikus fordulatszáma, mely alapvetően a gép rezonanciafrekvenciája. Hiszen a rezonanciafrekvencia olyan fordulatszámon található, ahol a gépszerkezet rezgései a legerősebbek. A gépszerkezet mindegyik eleme rendelkezik saját rezonanciafrekvenciával.

A rezonancia jelenlétének kimutatásához szükséges a rezgésszint mérése, a csapágyházon három különböző irányból (vertikális, horizontális, axiális). Ha a mért eredmények az egyik irányban kimagaslóak, akár a többszöröse is a többi eredménynek, akkor szinte biztos, hogy a rezonancia jelen van. A rezonancia a mechanikus erőket felerősíti, így keletkezik a magas rezgésszint az egyik irányban.

Ha a gépszerkezet fordulatszámának változása nagymértékű rezgésszint változással jár, akkor ez a jel, a rezonanciára utal. Ez a jelenség lehetővé teszi a rezonanciafrekvencia meghatározását, melynek ismeretében következtetni lehet a rezonáló gépelemre, alkatrészre.

Korábban a rezgések kevesebb problémát okoztak az üzemfenntartás világában, mint napjainkban. Ennek legfőbb magyarázata, a rezonancia megjelenésének egyre nagyobb valószínűsége. Korábban ugyanis a gépszerkezeteket merevebb, vastagabb alkatrészekből gyártották, ezért az önrezgésszámaik nagyok voltak. Ezzel szemben a gépszerkezetek fordulatszáma viszonylag kicsi, így a fordulatszámok és az önrezgésszámok megegyezhettek, vagyis a kritikus rezgést okozó rezonancia igen ritkán fordulhatott elő. A technológiai fejlődések következtében a szerkezetek hajlékonyabbak és vékonyabbak lettek, így csökkentek a önrezgésszámaik, ám a fordulatszámok növekedtek. Ezért közeledett

egymáshoz a fordulatszám és az önrezgésszámok tartománya, melynek következtében egyre gyakoribb jelenség lett a kritikus fordulatszám, vagyis a rezonancia jelensége.

## 1.2. A megengedhető rezgések

Minden gépszerkezet az üzemeltetés közben rezeg. Ezeknek a rezgéseknek az erőssége sok tényezőtől függ, például a gépszerkezetek konstrukciójától, az elhelyezésétől, az alapozásától, az üzemeltetési feltételeitől, a műszaki állapotától és még sok egyéb tényezőtől. Természetesen egy bizonyos erősségű rezgés még normálisnak mondható, hiszen ez a működésükből adódik. Azonban, ha a gépszerkezetek műszaki állapota romlani kezd az elhasználódás következtében, akkor a rezgések erőssége is ezzel arányosan növekedni kezd.

Legtöbbször az elfogadható műszaki állapot határozza meg a gépek hosszabb ideig tartó, úgynevezett üzemi rezgésszintjét. Az hogy a műszaki állapot mikor nevezhető elfogadhatónak, vagy megtűrtnek több tényező alapján állapítható meg:

- Legfeljebb akkorák lehetnek a gépek működése által keltett rezgések, hogy ezek ellenére a gépek kifogástalanul el tudják látni a munkafolyamatban betöltött funkciójukat.
- A keltett rezgések a gép hosszabb ideig, a tervezett élettartam végéig, az alkatrészek idő előtti károsodása nélkül el tudják viselni.
- A gépszerkezet rezgése a körülötte elhelyezkedő gépszerkezetek megfelelő működését ne befolyásolja a megengedhetőnél nagyobb mértékben.
- A gépszerkezet rezgéseivel a környezetében elhelyezkedő működő, vagy esetleg éppen nem üzemelő gépszerkezeteket ne tegye tönkre, és ne tegyen bennük anyagi kárt.
- Munka- és egészségvédelmi szempontokból a gép rezgéseivel ne hasson károsan az emberi szervezetre.

A gépszerkezetek műszaki állapotának megfelelőségének, elfogadhatóságának megítélésében a szabványok is segítséget nyújtanak. Az ISO 10816 1,2,3 szabvány (az ISO 2372 és az ISO

3945 szabvány utóda) a tapasztalattal még nem rendelkező rezgésdiagnosztikai méréseket végzőknek fontos alapul venni (1.1. táblázat).

| Géposztályok                                                                |      | I. osztály<br>(kis gépek<br>15 kW-ig) | II. osztály<br>(közepes gépek<br>75 kW-ig) | III. osztály<br>(nagy gépek<br>300 kW-ig<br>merev alapozás) | IV. osztály<br>(nagy gépek<br>300 kW-ig<br>rugalmas alapozás) |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|---------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| A rezgéssebesség effektív értéke 10-100 Hz<br>frekvenciatartományban [mm/s] | 0,28 |                                       |                                            |                                                             |                                                               |
|                                                                             | 0,45 |                                       |                                            |                                                             |                                                               |
|                                                                             | 0,71 |                                       |                                            | <b>Jó</b>                                                   |                                                               |
|                                                                             | 1,12 |                                       |                                            |                                                             |                                                               |
|                                                                             | 1,80 |                                       |                                            |                                                             |                                                               |
|                                                                             | 2,80 |                                       | <b>Elfogadható</b>                         |                                                             |                                                               |
|                                                                             | 4,50 |                                       |                                            |                                                             |                                                               |
|                                                                             | 7,10 |                                       | <b>Nem kielégítő</b>                       |                                                             |                                                               |
|                                                                             | 11,2 |                                       |                                            |                                                             |                                                               |
|                                                                             | 18,0 |                                       |                                            |                                                             |                                                               |
|                                                                             | 28,0 | <b>Elfogadhatatlan</b>                |                                            |                                                             |                                                               |
|                                                                             | 45,0 |                                       |                                            |                                                             |                                                               |

1.1. táblázat Az ISO 10816 nemzetközi szabvány alapján készült táblázat a gépszerkezetek rezgésvizsgálatára

A szabvány tartalmazza a rezgés mérésének feltételeit, végrehajtását, a mérési pontokat és a kiértékeléshez útmutatót ad. Előírás a gépszerkezetek mérésénél, hogy mindegyik csapágyházon minden irányból méréseket kell végezni és ezekből a mérésekből a legmagasabb rezgésszintet kell figyelembe venni a kiértékeléskor. A mérés és a kiértékelés alapja a frekvenciatartomány és a rezgéssebesség effektív értékben van kifejezve.

A szabványok használatának segítségével rendkívül könnyedén eldönthető, hogy az adott gépszerkezet műszaki állapota megfelelő-e, és továbbüzemeltethető-e. Ehhez segítséget nyújt az ISO 10816-3 szabvány, mely csoportosítja a gépeket négy különböző osztályokra, teljesítmény és ágyazás szempontjából, hiszen ezek a tényezők nagy mértékben befolyásolják a gépek rezgését.

### 1.3. Gépágyazás, mint rezgéstani probléma

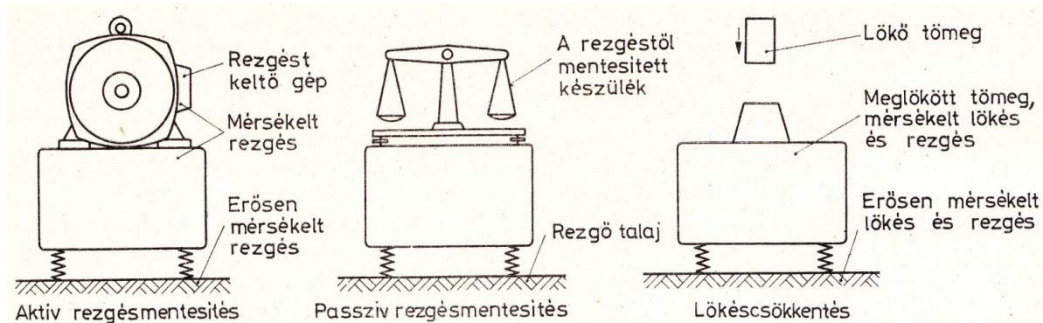
Valamennyi gépet, berendezést nem lehet csak úgy a földre, talajra, padlószerkezetre helyezni, hiszen a gépszerkezetek megfelelő, nyugodt, zaj- és rezgésmentes működését az alapzat helyes kialakítása biztosítja. Az alapozás vagy ágyazás hagyományos és rugós alátámasztással is megvalósítható.

A működésben lévő gépszerkezetek álló részeit szélsőséges szemléletben mozdulatlanoknak vélhetjük. Azonban a valóságban ez soha sincs így, hiszen valamekkora mértékben mozognak, rezegnek. Ezek a rezgések azért jöhetnek létre, mert sosem tudjuk teljes mértékben mereven rögzíteni a gépek álló részeit, ugyanis mind a talaj, mind a szerkezeti anyagok rugalmasan deformálhatók. A rugalmasan megfogott tömeget nevezzük mechanikai rezgőrendszernek, ami több különböző módon is rezgésbe hozható. A gépszerkezetek esetében üzem közben a rezgést a forgó részeg tömegeiből adódó kiegyensúlyozatlan tömegek és a külső erőhatások hozzák létre. Ezeket összesítve gerjesztő erőknek hívjuk, melyek időbeli változásuk szerint lehetnek periodikusan változó, pillanatnyilag ható és lökésszerű terhelések. Ezen kívül a gépek, gépszerkezetek rezgései kialakulhatnak még oly módon, hogy a gépszerkezetet tartó, alátámasztó talaj, padlószerkezet rezeg egy másik, akár szomszédos gépszerkezet hatására.

Az eddig leírtak alapján egyértelmű, hogy a gépszerkezetek alapozását, felállítást megfelelően megtervezett módon érdemes kivitelezni, melyhez segítséget nyújthatnak a rezgésdiagnosztikai eszközök. Ezáltal kedvezőbb rezgési feltételeket alakíthatunk ki, tehát a gépszerkezet és a környezet rezgéseinek mértéke és az ezekből adódó dinamikus igénybevételek kellően kicsik legyenek. A gépszerkezet alapozás, ágyazás megfelelő rezgéstani méretezési és kialakítási eljárásokat három különböző csoportra oszthatjuk, melyet az 1.1. ábra is illusztrál:

- Aktív rezgésmentesítés: ebben az esetben, magát a rezgéseket létrehozó gépszerkezetnek, és a környezetének a rezgését próbáljuk korlátozni.
- Passzív rezgésmentesítés: ebben az esetben, a környezet rezgéseit megpróbáljuk távol tartani a gépszerkezettől.

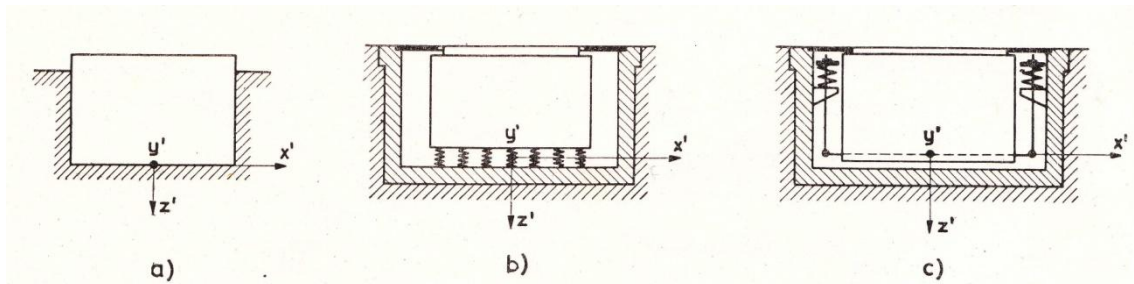
- Lökéscsökkentés: ebben az esetben, a lökés hatást kifejtő gépszerkezet rezgéseit, illetve a környezetében kialakuló lökést és rezgéseket próbáljuk korlátozni.



1.1. ábra A gépágyazások méretezési eljárásainak felosztása

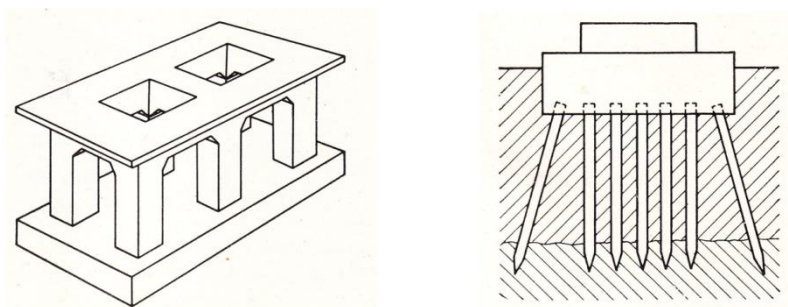
A méretezési eljárások mellett, fontos megemlíteni a gépágyazások fajtáit is. Szerkezeti szempontok szerint az alábbi módon csoportosíthatjuk őket:

- 1) **Tömbalapok:** A rezgő rendszer tömegét együttesen alkotja az alaptömeg és a gépszerkezet tömege alkotja, a rugózást pedig vagy az alap (1.2. ábra a) része), vagy rugalmas alátámasztás (1.2. ábra b) része), vagy rugó és inga kombinációja (1.2. ábra c) része) biztosítja.



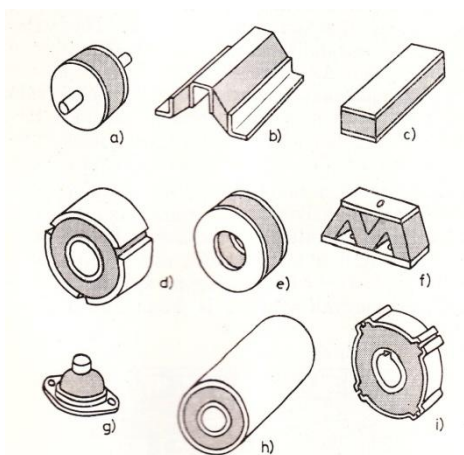
1.2. ábra Tömbalapok fajtái

- 2) **Keretalapok:** A legfőbb előnye, hogy az alaplapp tartóinak rugalmassága, illetve a tömege folytonos elosztású. Méretezés szempontjából bonyolult szerkezet, mivel többtömegű rezgőrendszernek tekinthető. (1.3. ábra)
- 3) **Falazott alapok**
- 4) **Cölöpalapok**



1.3. ábra A keret- (bal oldali) és a cölöpalap (jobb oldali)

- 5) Rugalmas gépalapok: Kiseb gépek esetén akár közvetlenül a talajra helyezve, alaptömb nélkül is használható. Ezt a megoldást főleg kicsi gerjesztő erővel és viszonylag merev gépvázzal rendelkező forgó mozgást végző gépeknél valósítható meg. Kizárólag helyes rezgéstani méretezések alapján alkalmazható. (1.4. ábra)



1.4. ábra Rugalmas gépalátámasztás létesítésére felhasználható gumirugók

## 2. A rezonancia kimutatásának módszerei

A gépszerkezetek kritikus rezonanciahatárának meghatározására számos módszert alkalmazhatunk. Létezik olyan módszer, mellyel álló helyzetben és van, mellyel a gép üzemeltetése közben végezhetünk méréseket. Azonban a legfontosabb, hogy a rezonancia hely- és időfüggő, így több irányból is méréseket kell végezni.

A rezonanciafrekvencia megállapításához az alábbi eljárások alkalmazhatók:

- Mechanikai számítási módszer
- Véges elemes modellezés, mely az egyik legpontosabb számolós módszer,
- Spektrum és időjel analízis, mely rendkívül precíz műszerezettséget és kellő szakértői tapasztalatot igényel. Valamint, jelenleg ez a leghatékonyabb mérési módszer a gépszerkezetek állapotfelmérésében.
- Kifutás vizsgálat, mely a valóságban a leggyakrabban alkalmazott mérési eljárás a rezonancia kimutatására.
- Kalapácsütés, vagy „Bump” teszt, ami egy kísérleti eljárás, mely egy impulzusszerű gerjesztésnek teszi ki a gépszerkezetet, és a rezonanciafrekvenciára a válaszfüggvényből lehet következtetni.

Dolgozatomban utóbbi három, az ipari gyakorlatban is alkalmazható mérési eljárások bemutatására térek ki részletesebben.

### 2.1. Spektrum és időjel analízis

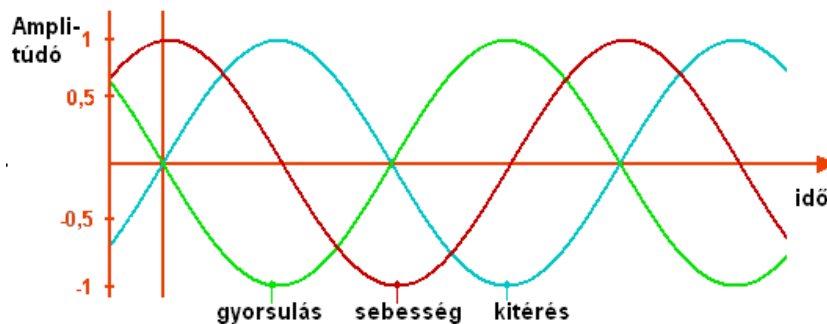
A spektrum és időjel analízis alapját a következő gondolatmenet képzi: „Minden gép, gépszerkezet illetve gépalkatrész, mint „merev” test azzal az alapvető mechanikai tulajdonsággal rendelkezik, hogy leginkább egy-egy bizonyos „saját” frekvencián képes adott irányokban rezgéseket végezni. A felvett rezgésjel spektrumanalízisével „láthatóvá” válik, hogy milyen frekvenciájú rezgések vannak jelen. A rezgésfrekvenciák viszont hozzárendelhetők bizonyos gépalkatrészekhez és tipikus géphibákhoz, természetesen az

aktuális gépfordulatszám figyelembevételével.” [1] Ez a mérési eljárás lehetővé teszi az egyes gépelemek pontos hibafelderítését, még a tönkremenetel előtt.

A spektrum és időjel analízis háttérében a következő rezgéstani alapok húzódnak:

- **Időjel,**

A rezgésspektrum alapját képi egyértelműen a frekvencia, az amplitúdó és a fázisszög. Általánosan elmondható, hogy vizsgálati szempontból a gépek hibaforrását a rezgés-frekvenciából, annak súlyosságát pedig a rezgés-amplitúdóból lehet kikövetkeztetni. A harmonikus rezgés pillanatnyi elmozdulásaként, sebességeként és gyorsulásaként is meghatározható a rezgés amplitúdója az időtartományban, ahogy a 2.1. ábra is mutatja.



2.1. ábra A kitérés, a sebesség és a gyorsulás időbeli összefüggése

A kitérés első differenciálhányadosa a sebesség, a második pedig a gyorsulás. A függvények a deriválás során nem szenvedtek alakváltozást, így maradt a harmonikus jellegük. Az amplitúdó kap egy  $\omega$  szorzót, és  $\pi/2$  értékű fáziseltolást szenved az deriválás során, melynek köszönhetően a sebesség hullámhossza egy negyeddel, a gyorsulása pedig egy féllel ugrik előre a kitéréshez képest.

- A kitérés:  $s(t) = A \cdot \sin \omega t$  [ $\mu\text{m}$ ]

- A sebesség:  $v(t) = \frac{ds}{dt} = A\omega \cdot \cos \omega t = A\omega \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$  [mm/s]

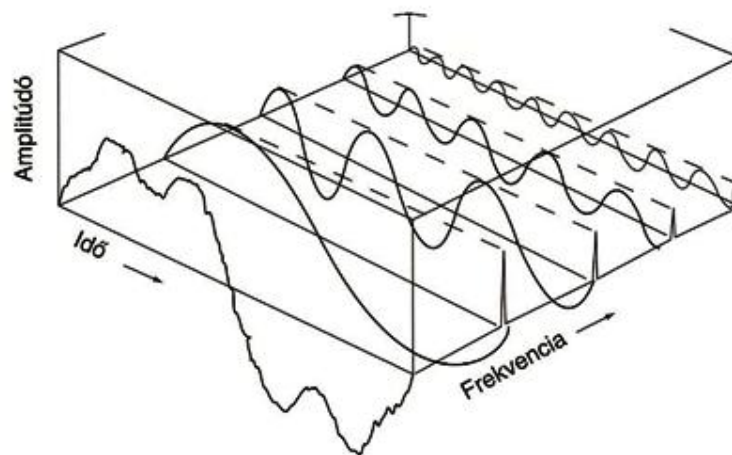
- A gyorsulás:  $a(t) = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \cdot \sin \omega t = A\omega^2 \cdot \sin(\omega t + \pi)$  [mm/s<sup>2</sup>]

A gyakorlatban nagyon ritka, hogy kizárólag csak egy szinuszos jellegű rezgés legyen jelen a vizsgálatban, hiszen a gépek rezgései összetett jellegűek. Egy mérőhelyen a

gépszerkezet műszaki hibáiból és az alkatrészek sokaságából adódóan, egyszerre több eltérő amplitúdójú és frekvenciájú rezgések vannak jelen, mely már vizuálisan nehezen elemezhető időjelet eredményez.

- **Időjelből spektrum, vagyis Gyors Fourier Transzformáció (FFT),**

A időjelet szét kell bontanunk elemi szinuszos jellegű komponensekre, és az időtartományt, frekvenciatartomány váltja fel, ahol spektrumként jelenik meg a rezgés, melynek már lényegeseb egyszerűbb az interpretálhatósága.

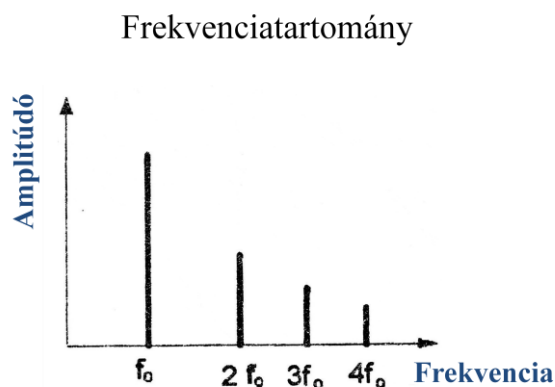


2.2. ábra Az időjel áttanszformálása spektrummá

A 2.2. ábrán látható eredményt matematikailag a Gyors Fourier Transzformáció (Fast Fourier Transformation, FFT) alkalmazása teszi lehetővé.

- **Spektrum.**

A transzformálás lehetővé teszi a periodikus rezgés harmonikus összetevőkre való bontását. Az összetevők frekvenciája mindig az alapharmonikus frekvenciájának ( $f_0$ ) az egészszámú többszörösei ( $2 f_0$ ,  $3f_0$ , stb.), ahogy ezt a 2.3. ábra is mutatja.



2.3. ábra Alap- és felharmonikusok

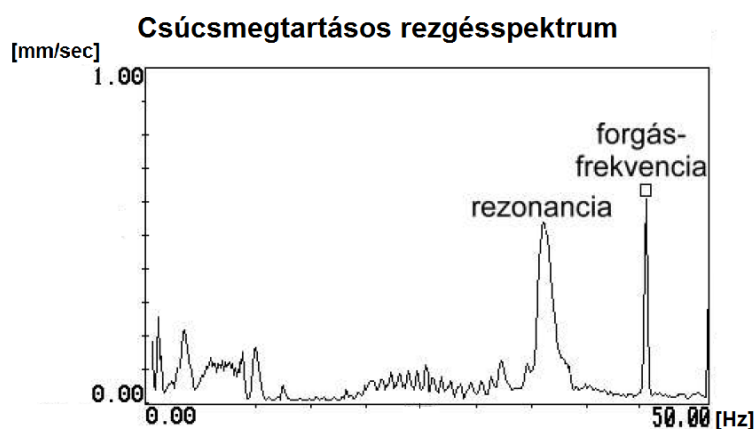
A spektrum tulajdonképpen, a rezgés különböző frekvenciájú összetevőinek az összessége. A spektrumot egy derékszögű koordináta-rendszer vizualizálja, melynek abszcisszáján a percenkénti ciklusszám, vagyis a frekvencia, ordinátáján az összetevők amplitúdója, vagy az effektív értéke található.

A spektrum és időjel analízis a rezgésdiagnosztikai vizsgálatok egyik legfontosabb eszköze, hiszen ez a mérési eljárás nem csak a rezonancia kimutatására alkalmas, hanem sok egyéb a gépszerkezetek műszaki állapotára utaló paraméterek vizsgálatára is.

## 2.2. Kifutás vizsgálat

A kifutás vizsgálat gyakorlatilag kihasználja a forgó gépszerkezetek felfutása és leállítása során fellépő változó frekvenciákkal rendelkező gerjesztéseket a rezonanciák felderítésére. Fontos figyelembe venni, hogy ennél a módszernél, az alkalmazott gerjesztést a fordulatszám függvényében kell vizsgálni. Ennél a vizsgálati módszernél lehetőségünk van különböző vizsgálati felvételekre. Ilyen felvétel többek között a csúcsmegtartásos (Peak-hold) spektrumfelvétel, a vizesés-spektrumfelvétel, és a rezgés-amplitúdó és fázisszög fordulatszámtól függő felvétele is, amelyet Bode-diagramnak is nevezünk.

- **Csúcsmegtartásos, vagy Peak-hold spektrumfelvétel,**

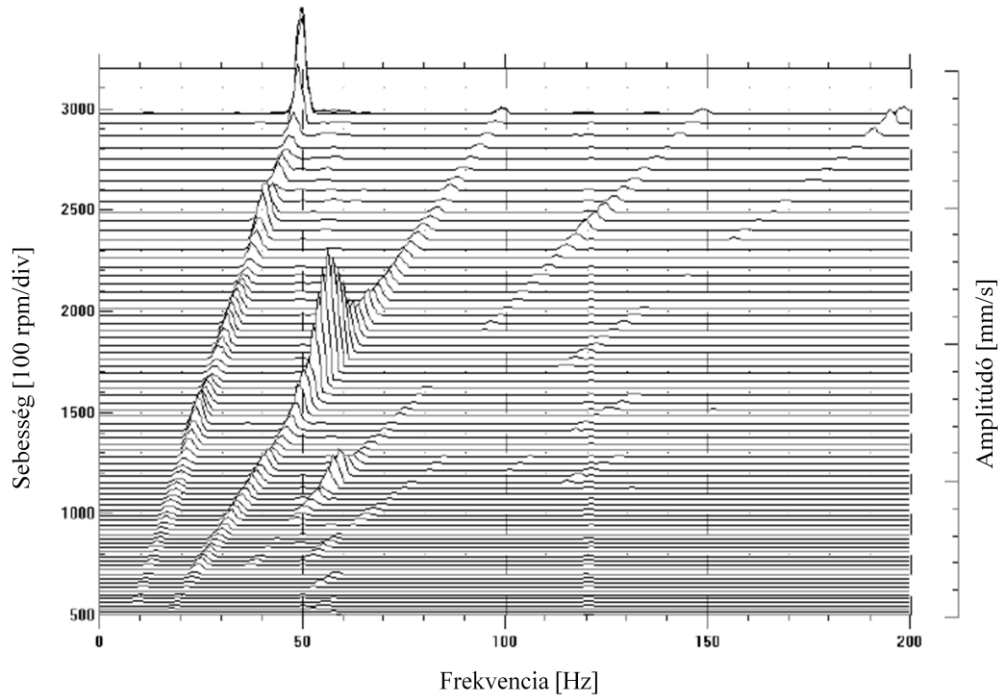


2.4. ábra Csúcsmegtartásos, Peak-hold spektrumfelvétel

Ebben az esetben tulajdonképpen kihasználjuk a mérőműszereknek azt a képességét, mely szerint a műszer több spektrumot is képes átlagolni. A csúcsmegtartásos módon,

az összes frekvencián az éppen hozzá tartozó legnagyobb értékkel rendelkező amplitúdó megtartását értjük. Ennek az eredménye, hogy egy elmosódott, de szélesebb spektrumot kapunk, melyből a rezonanciára utaló amplitúdó-hely vehető ki, ahogy ezt a 2.4. ábra is mutatja.

- **Vízesés-spektrum felvétel,**



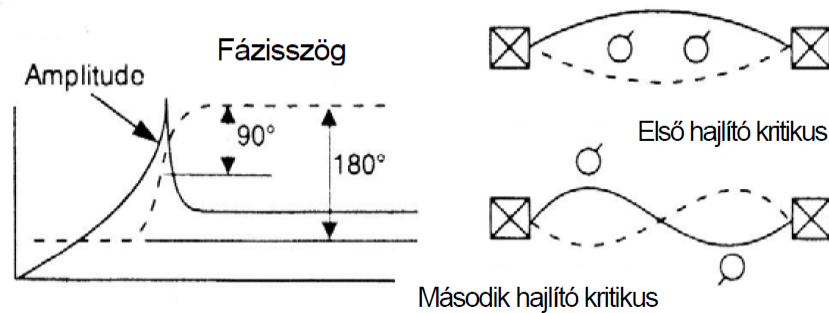
2.5. ábra Vízesés-spektrum felvétel

Ez a felvétel gyors spektrumanalízisre képes és nagy tárolókapacitással rendelkező műszert igényel, mivel a kifutás alatt vagy előre beállított időközönként, vagy a gépszerkezet fordulatszámának függvényében kell rögzíteni a rezgésspektrumot. Az így kapott spektrumokat, egyszerűen csak egymás mögött jeleníti meg, így megkapjuk az úgynevezett vízesés-spektrum ábrát. Ez a megjelenítési forma meglehetősen szemléletes, ráadásul ennek segítségével könnyedén felismerhető az összes amplitúdó-kiemelkedés.

- **A rezgés-amplitúdó és a fázisszög fordulatszámfüggő felvétele.**

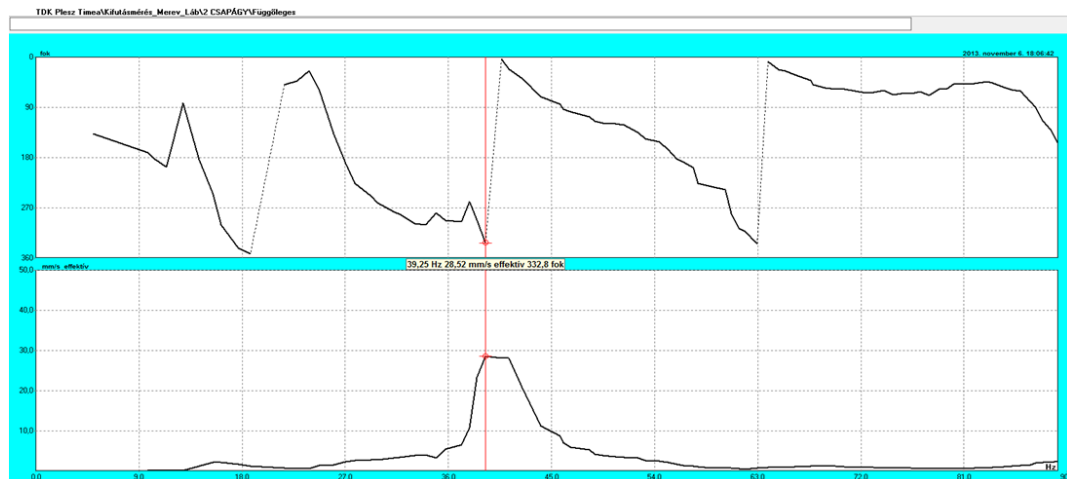
A gyakorlatban megfigyelhető, hogy ha egy gépszerkezet forgórészét közvetlen a rezonanciafrekvencián, vagy annak közelében üzemeltetnek, akkor szinte lehetetlen a gép rezgéseinek kiegyenlítése, vagy csökkentése a nagymértékű fáziseltolódásokból kifolyólag. Tehát a rezonanciafrekvencia alatt és fölött a fázisszögek jelentős mértékben eltérnek. Ahogy ezt a 2.6. ábra is mutatja, a rezonanciafrekvencián akár

90°-os fáziseltérése is lehetséges, vagy az meghaladva akár még 180°-os, vagy annál nagyobb fáziseltérés is lehetséges.



2.6. ábra Fázisszög eltolódás a tengely hajlító kritikus frekvenciájánál

Ahhoz, hogy ezt az elvet vizsgálni tudjuk, szükséges a rezgés-amplitúdó, és a hozzá tartozó fázisszög mérése is. Ezért nagyon fontos, hogy olyan mérőműszert válasszunk, mely lehetővé teszi a két paraméter egyidejű mérését. A vizsgálni kívánt forgó részt vagy felgyorsítjuk az üzemi fordulatra (felfutási mérés), vagy éppen onnantól lassítjuk le megállásig (lefutási mérés). Ebből megkapjuk a két mérési jellemzőt. A 2.7. ábrán alul megfigyelhető az amplitúdó-kiemelkedés, felül pedig a rezonanciafrekvencián történő fázisszög változás is.



2.7. ábra Az amplitúdó és a fázisszög fordulatszámfüggő felvétele

### 2.3. Kalapácsütés, vagy „Bump” teszt

A kalapácsütés teszt, vagy „Bump” teszt a legegyszerűbbnek mondható vizsgálati eljárás, mely képes a rezonancia mérésére. A módszer alapja, hogy egy egyszeri ütés segítségével gerjesztjük a gépszerkezetet és ekkor rögzítjük az ütési impulzus lefutását, valamint az ütés hatására keletkező rezgések spektrumait. A rezonanciafrekvenciák láthatóvá válnak a

spektrumban található amplitúdó-kiemelkedések formájában. „Völgyek” formájában pedig megjelennek az úgynevezett antirezonancia tartományok. A kiemelkedési és a völgyszerű tartományok szélességei egyértelműen jellemzi az ütés csillapítását.

A kalapácsütés teszt értelemszerűen csak a kevés alkatrészből álló gépszerkezetek körében terjedt el igazán, hiszen a vizsgálat során minden egyes statikailag külön álló elemen, több irányból is el kell végezni a gerjesztést. Azt, hogy milyen, és mekkora kalapáccsal végezzük a gerjesztést, befolyásolja, hogy hány Hz-es gerjesztést szeretnénk kapni. Hiszen például egy gumikalapáccsal csak alacsony, de például egy vaskalapáccsal már igen magas gerjesztés hozható létre. Épp ebből kifolyólag, ez a fajta eljárás, nagy gépszerkezetek és magas frekvenciák mellett már nem alkalmazhatók.

### 3. A rezonanciák vizsgálatára alkalmazott eszközök, műszerek, szoftverek és számítások

#### 3.1. VIBROTESTER próbapad bemutatása

A VIBROTESTER próbapad az egyetem által oktatási célból kifejlesztett rezgésdiagnosztikai berendezés, melynek köszönhetően elemezhető, modellezhető és bemutatható a forgó mozgást végző gépek üzemeltetése alatt előforduló rezgések, melyek összefüggésbe hozhatók a gépszerkezetek tönkremenetelével. A próbapad sok előnyös tulajdonsággal rendelkezik, mely még inkább elősegíti a rezgésdiagnosztika, valamint az állapotfüggő karbantartás demonstrálását, vizsgálatát:

- tömegének, geometriai kialakításának, és merev alaplemezőének köszönhetően hordozható,
- a hornyokkal ellátott alaplapnak köszönhetően könnyű a szerelhetősége,
- alapozása változtatható lágyra, rugalmasra és merevre is a cserélhető lábak által,
- könnyen, és gyorsan átalakítható a különféle műszaki diagnosztikai eszközök és rezgésmérési kísérletekhez,
- fokozatmentesen állítható a fordulatszám,
- szabályozható a fel- és a kifutási időtartam,
- lehetőség van különböző kialakítású tengelyek felszerelésére,
- a tengely tárcsáin lévő furatok segítségével lehetőség van kiegyensúlyozatlanságot okozó tömegek felszerelésére,
- a hajtómotor hajtása különböző szíjak és láncok segítségével is továbbítható,
- üzemeltetése biztonságos mind a kezelő, mind a megfigyelők számára.

A VIBROTESTER próbapad legfőbb műszaki paraméterei:

Mérete: 700 mm x 350 mm x 300 mm

Össztömeg: kb. 20 kg

Horonyosztás: 50 mm

Hajtómotor típusa: Siemens 1LA7-063-2AA

Hajtómotor teljesítménye: 180 kW

Hajtómotor fordulatszáma: 2860 1/min

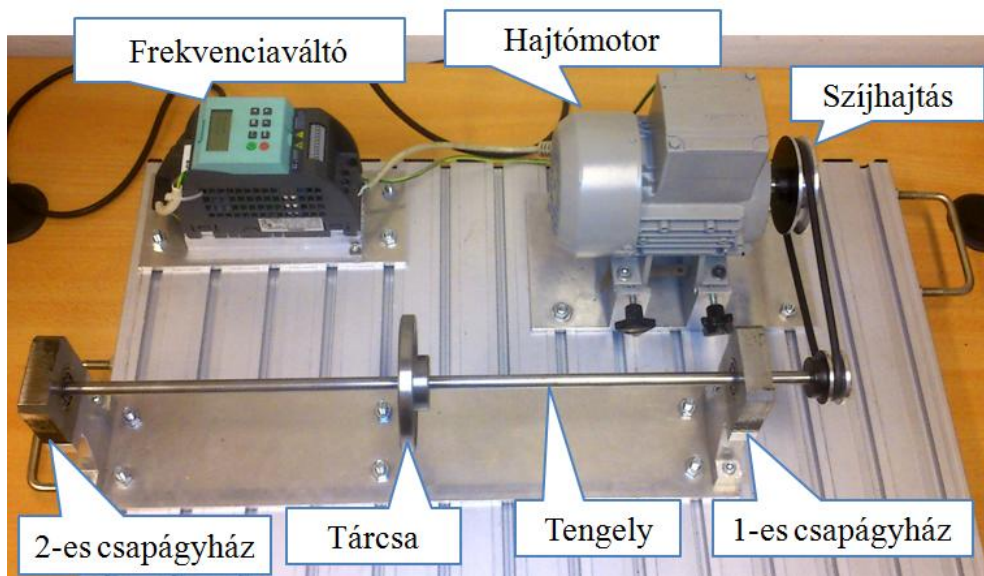
Frekvenciaváltó típusa: Siemens Sinamics G110

Fordulatszám tartomány: 0-6000 f/perc

Tengelyvég átmérő: Ø 10 mm

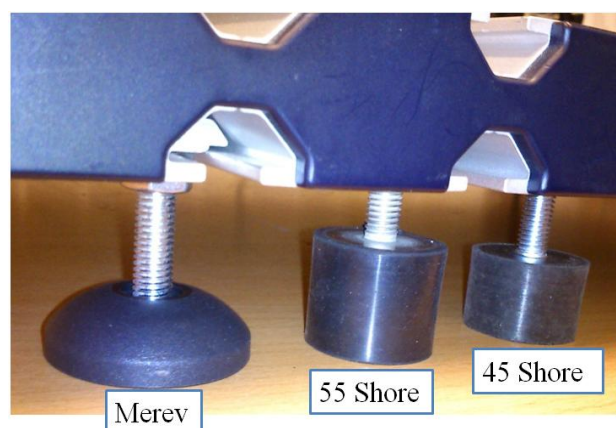
Csapágytípus: SKF 6202

A dolgozat megírásához szükséges kísérletekhez a próbapadot a 3.1. ábrán látható formában építettem fel, mivel a rezonancia kimutatásához elengedhetetlen a kritikus fordulatszám felismerése, melyre a legalkalmasabb a próbapad „Laval-tengely” modulja.



3.1. ábra Rezonancia vizsgálatára alkalmazott mérési összeállítás

Méréseim során arra a kérdésre is kerestem a választ, hogy milyen mértékben befolyásolja a gépszerkezet alapozása a rezonanciafrekvencia értékét. Ebből kifolyólag a vizsgálatokat három különböző keménységű lábon is elvégeztem.

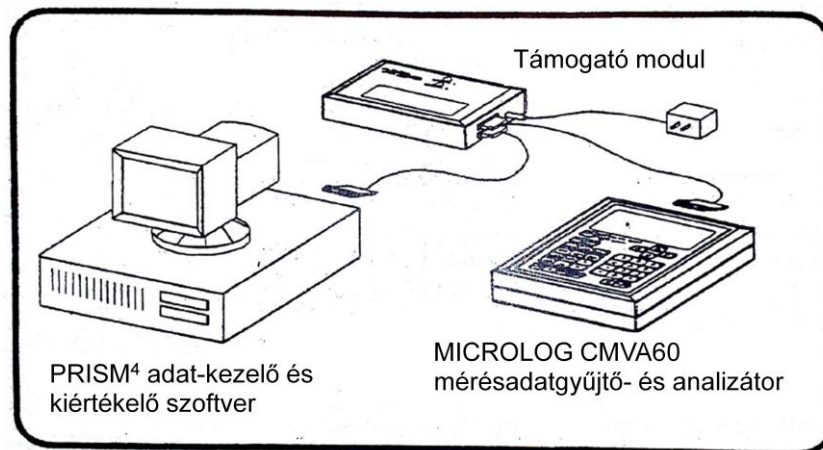


3.2. ábra A mérések során felhasznált merev és rugalmas lábak

A 3.2. ábrán látható a merev, műanyagból készült és a két rugalmas, de különböző keménységű rezgéselnyelő talp, melyeket a méréseimhez felhasználtam.

### 3.2. A MICROLOG rendszer ismertetése

A mérések során az SKF gyártmányú rezgésmérésre alkalmas diagnosztikai rendszert használtam, mellyel lehetőség van egyszerű és gyors mérések elvégzésére, illetve a mért adatok rögzítésére, tárolására. A rendszer három egységből épül fel, melyet a 3.3. ábra is mutatja, a MICROLOG CMVA60 mérésadatgyűjtő- és analízátorból, a PRISM<sup>4</sup> adat-kezelő és kiértékelő szoftverből és a támogató elemből.



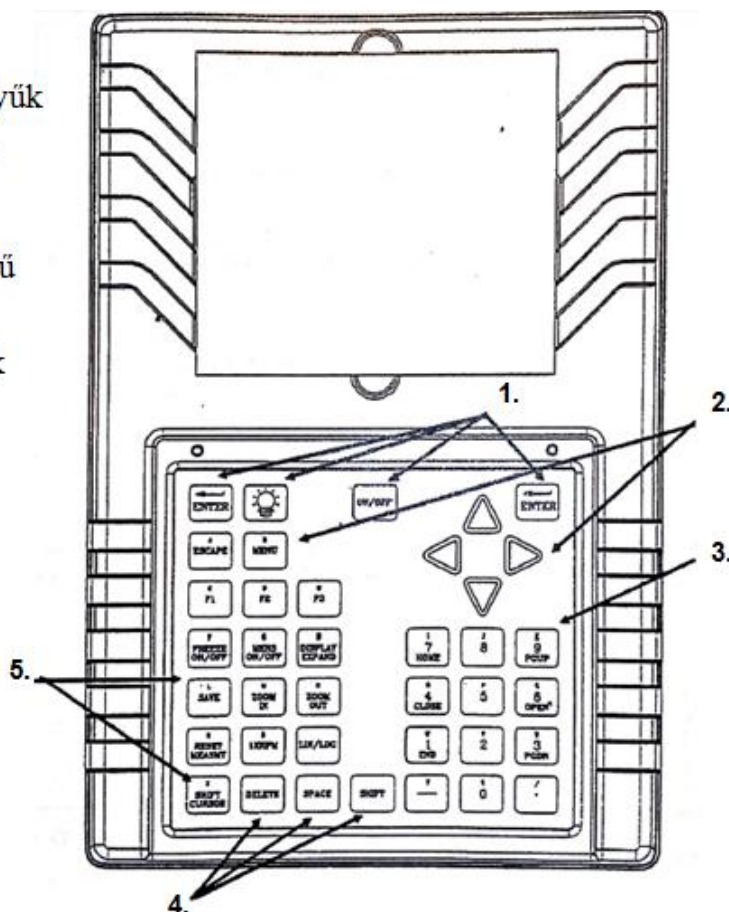
3.3. ábra A MICROLOG diagnosztikai rendszer

#### A MICROLOG CMVA60 adatgyűjtő

A CMVA adatgyűjtő könnyű, kézzel is hordozható, mérési adatok gyűjtésére és tárolására alkalmas készülék, mely a 3.4. ábrán is látható. A terminál képes a gépszerkezetek rezgéseit, hőmérsékletet és sok egyéb műszaki állapotra utaló paraméter méréseit elvégezni. A méréseket a műszerhez csatlakoztatható különböző kiegészítő szondával vagy mágneses rögzítésű érzékkelővel valósítható meg. A MICROLOG az adatgyűjtő funkció mellett, alkalmas minden olyan művelet elvégzésére, melyet a nagyteljesítményű analízátorok tudnak. Tehát alkalmas a mért időjelet FFT (Gyors Fourier Transzformáció) segítségével nagy felbontásban (alkalmas 100-tól 6400 vonalig tartó megjelenítésre) megjeleníteni a spektrumokat, melyek részletes elemzés alá vethetők, de akár a régebbi mérések spektrumképei is visszanezhetők. A megjelenítésben segít a folyadékkristályos LCD kijelző.

A műszer kiegészítő eszközei, tartozékai: kombinált SEE- és gyorsulásérzékelő, optikai fázisreferencia, impulzus kalapács, stroboszkóp, infravörös hőmérsékletérzékelő szonda.

1. Működtető billentyűk
2. Vezérlő billentyűk
3. Számbillentyűk
4. Vegyes rendeltetésű billentyűk
5. Funkció billentyűk



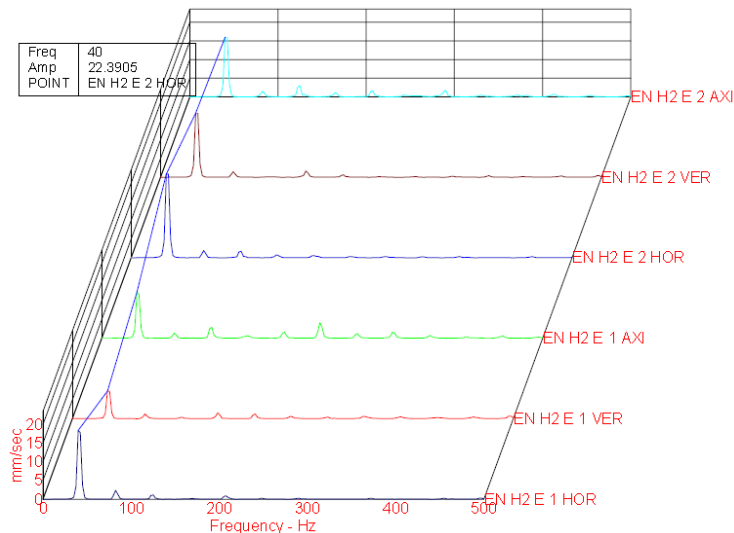
3.4. ábra A CMVA60-as készülék

A CMVA60 rendszer tulajdonságai:

- a mérési tartomány: 0,5 Hz – 20 kHz
- programozható mérési paraméterek:
  - frekvenciatartomány
  - átlagolás mód
  - mérőhely érzékenység
  - felbontó képesség
  - szűrő ablakok (Hanning, Uniform, Flat Top)
- rezgések megjelenítése, analízise idő- és frekvenciatartományban
- automatikus spektrum összehasonlítás
- különböző mérési eljárások elemzésére alkalmas, mint például cikluselemzés, motoráram elemzés, ütésteszt elemzés, kifutás vizsgálat.
- akár több száz mérési adatot képes tárolni
- gyors adatátviteli sebesség
- van lehetőség a közvetlen nyomtatásra

### A PRISM<sup>4</sup> for Windows adatfeldolgozó és adatbázis kezelő program

A PRISM<sup>4</sup> szoftver ideális Windows alapú kiegészítője a MICROLOG rendszernek, mely egy angol nyelven futó diagnosztikai és adatbázis kezelő program. A mérések során nagy előny hogy a program segít az eredmények egyszerű áttekintésében, tárolásában, és azok dokumentálásában és értékelésében. Ezen kívül, különböző segédprogramok használatával, még könnyebbé válik a hibák megtalálása.



3.5. ábra Waterfall diagram megjelenítése a PRISM<sup>4</sup>-es kezelőprogram segítségével

Lehetőség van a különböző időpontokban elvégzett mérési eredmények spektrumainak az összehasonlítására, Waterfall, vagyis vizesés (lásd a 3.5. ábrán) és Palogram jellegű diagramon.

#### Támogató egység

A MICROLOG és a PRISM<sup>4</sup> között teszi lehetővé a gyors adatátvitelt. Segítségével feltölthetők a mérőműszerre, a számítógéppel előre összeállított mérési útvonalak, a mérést követően pedig a számítógépes adatbázisba tölthető vissza a mért rezgési spektrumok felvételei.

### 3.3. Az Easy-Viber rendszer

A VIM (Vibrations Mät Instrument) gyártmányú Easy-Viber rendszer az Easy-Viber Manual kompakt, kézi mérőműszeréből és a műszert támogató SpektraPro számítógépes kezelőszoftverből áll.

### Easy-Viber rezgésanalizátor és mérési adatgyűjtő

Az Easy-Viber egy rezgéselemző és adatgyűjtő kézi mérőműszer, mely egy igen professzionális eszköz a gépanalizáló-adatgyűjtők között. Használata nagyon egyszerű még a kezdő diagnoszták számára is, hiszen magyar nyelvű menürendszere és nagyméretű kijelzője nagy segítséget nyújt a rezgésmérések során. Az eszköz a 3.6. ábrán látható.



3.6. ábra Az Easy-Viber kézi mérőműszere

A mérőműszer több kiegészítő elemmel, tartozékkal rendelkezik, mint például a fázisszög-mérő vagy a két gyorsulásérzékelő, melyeket a két csatlakozó felületnek köszönhetően egy időben is használhatjuk.

### SpektraPro adatfeldolgozó és adatbázis kezelő program

A SpektraPro magyar nyelvű, könnyen kezelhető Windows alapú adatok tárolására és kiértékelésére alkalmas rezgésdiagnosztikai szoftver. A mérőműszer és a kezelőprogram közötti kommunikációért egy soros interface felel.

A program rezgéselemző funkciói között lehetőségünk van több különböző diagramok egyidejű megjelenítésére és azok összehasonlítására, mint például az időjelek, spektrum, vizesésdiagramok. Kiértékeléskor lehetőségünk van a beszámolók kinyomtatására, vagy Word-be való exportálására.

### 3.4. A rezonancia vizsgálatához alkalmazott számítás

Mivel a vizsgálatok során a „Laval-tengely” mérési összeállítást alkalmaztam, ezért elengedhetetlen a kritikus fordulatszám számítással történő meghatározása, melyet a mérési paraméterek meghatározására használtam.

A számításhoz szükséges alapadatok a következők:

- tengelyátmérő:  $d = \varnothing 10 \text{ mm}$
- tengelyhossz:  $l = 500 \text{ mm}$
- A tengely másodrendű nyomatéka:  $I = \frac{d^4 \pi}{64} = 4,90873 * 10^{-10} \text{ m}^4$
- Az acél rugalmassági modulusa:  $E = 2,1 * 10^{11} \text{ N/m}^2$
- A tengely és a tárcsa tömege, melyet mérleg segítségével mértem meg:  
 $m = m_{\text{tg}} + m_{\text{tcs}} = 0,5 + 0,345 = 0,845 \text{ kg}$

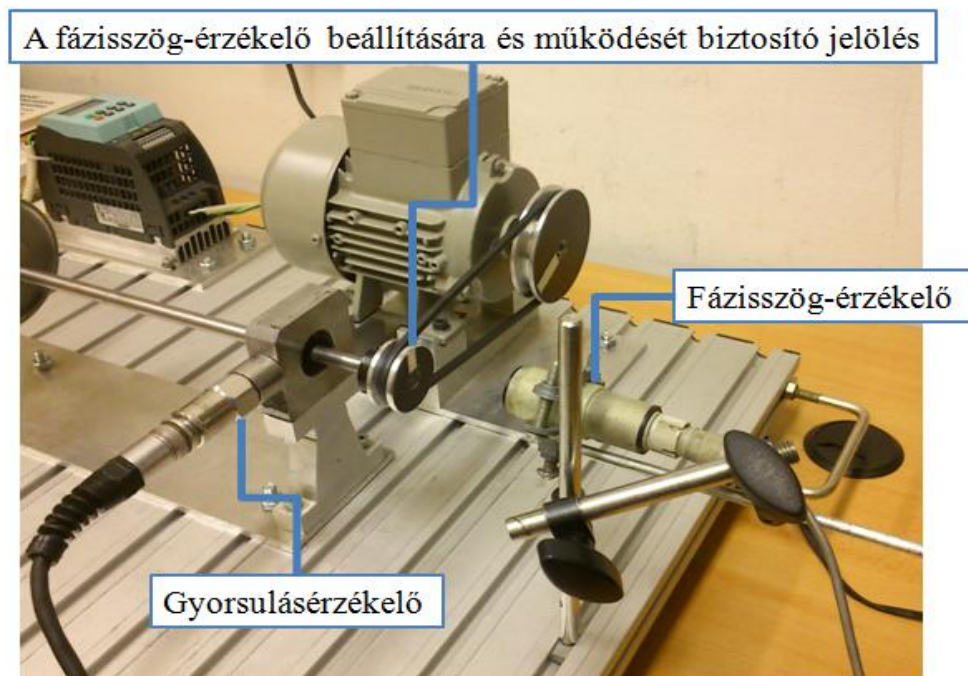
A kritikus fordulatszám csillapítás nélkül (gumi rezgéselnyelő bakok), merev rendszer esetében:

$$\omega_k = \sqrt{\frac{48EI}{ml^3}} = \sqrt{\frac{48 * 2,1 * 10^{11} * 4,90873 * 10^{-10}}{0,845 * 0,5^3}} = 218,01 \frac{1}{s} \quad n_{\text{krit}} = \frac{\omega}{2\pi} = 34,72 \frac{1}{s} = 2083 \frac{1}{\text{min}}$$

## 4. Rezonancia kimutatása rezgésspektrum és időjel analízissel

### 4.1. A mérési körülmények

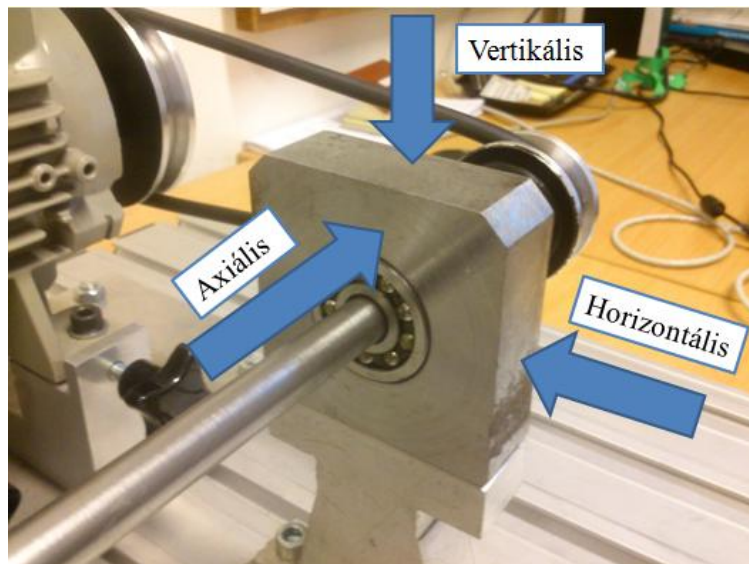
A rezgésspektrum és időjel analízis során a rezgés-spektrumokat, az időjel alakokat és a fázisszög változásokat elemeztem a rezonancia kimutatásához. Ehhez a vizsgálathoz, a VIBROTESTER próbapadhoz fel kellett szerelni egy plusz elemet, egy fázisszög-érzékelőt, melyet a tengellyel egyvonalban, a tengely szíjtárcsáján lévő fehér jelzés felé nézve kellett beállítani. Az analízishez a MICROLOG rendszert használtam, melyhez tudtam csatlakoztatni a fázisszög-érzékelőt és a rezgések méréséhez szükséges mágneses rögzítésű gyorsulásérzékelőt is. A mérési összeállítást és az érzékelők pozícióját a 4.1. ábra mutatja.



4.1. ábra Fázisszög-érzékelő és gyorsulásérzékelő pozíciója a próbapadon

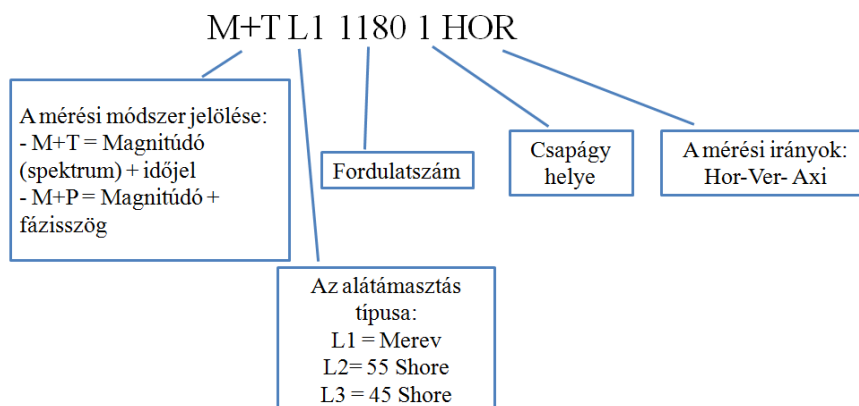
A mérést 5 különböző előre megtervezett fordulatszámmon végeztem el, melyeket az alaplagra szerelt frekvenciaváltó segítségével tudtam beállítani. A megfelelő fordulatszámok kiválasztására ügyeltem már a mérések tervezésekor is. A fordulatszámokat igyekeztem a rezonancián, a rezonancia alatt, fölött illetve a rezonanciafrekvencia fordulatszámának kétszeresére beállítani.

Mivel a rezonancia megfelelő kimutatásához, fontos hogy, minden irányban mérjünk rezgéseket, ezért ahogy az a 4.2. ábrán is látszik, három különböző irányból (horizontális, vertikális és axiális) is vizsgáltam a rezgéseket.



4.2. ábra Mérési irányok

A rezgésspektrum és időjel analízis során elvégeztem mind a két csapágyon, mind a három irányból, mind az öt fordulatszám, és mint a három lehetséges láb felhasználásával a méréseket. Ezeket a méréseket egy előre meghatározott útvonal alapján végeztem, melyet előzetesen a PRISM<sup>4</sup> szoftver segítségével terveztem meg. A mérési útvonalak felépítésénél a mérési eredmények jelölését logikai rendszer szerint készítettem el, ezt a 4.3. ábra is mutatja.



4.3. ábra A mérési eredmények jelölése

A mérési útvonalat ezután a MICROLOG CMVA60 adatgyűjtőbe importáltam. Majd a CMVA60 adatgyűjtőhöz csatlakoztattam az érzékelőket, és a megfelelő fordulatszám beállításával, az érzékelő többszöri áthelyezésével, a lábak többszöri átszerelésével elvégeztem a méréseket. A mérési eredményeket az adatgyűjtőből beimportáltam a PRISM<sup>4</sup> szoftverbe, ahol lehetőségem volt az értékeket különböző diagramok formájában megjeleníteni és dokumentálni.

Az általam kialakított mérési útvonal és a mérőműszer legfontosabb beállításainak táblázatát a 4.4. ábrán kísérhetjük figyelemmel. A táblázatban az „ID” a mérési azonosítót, a „Units” a mértékegységet, a „Last Value” a mérési eredményt, a „Frequency” a vizsgált frekvenciatartományt, „Lines” a felbontást, a „Speed” a mérési fordulatszámot, a „Window Type” a mérésnél alkalmazott ablak technikát, és a „Date” a mérés időpontját mutatja be.

| ID                      | Units  | Last Value | Frequency | Lines | Speed    | Window Type | Date      |
|-------------------------|--------|------------|-----------|-------|----------|-------------|-----------|
| Machine M+T L1 1180 RPM |        |            |           |       |          |             |           |
| M+T L1 1180 1 HOR       | mm/sec | 2.453      | 0 -400 Hz | 800   | 1180 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L1 1180 1 VER       | mm/sec | 2.353      | 0 -400 Hz | 800   | 1180 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L1 1180 1 AXI       | mm/sec | 3.821      | 0 -400 Hz | 800   | 1180 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L1 1180 2 HOR       | mm/sec | 1.713      | 0 -400 Hz | 800   | 1180 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L1 1180 2 VER       | mm/sec | 1.807      | 0 -400 Hz | 800   | 1180 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L1 1180 2 AXI       | mm/sec | 1.073      | 0 -400 Hz | 800   | 1180 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| Machine M+T L2 2300 RPM |        |            |           |       |          |             |           |
| M+T L2 2300 1 HOR       | mm/sec | 6.123      | 0 -400 Hz | 800   | 2300 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L2 2300 1 VER       | mm/sec | 16.98      | 0 -400 Hz | 800   | 2300 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L2 2300 1 AXI       | mm/sec | 14.2       | 0 -400 Hz | 800   | 2300 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L2 2300 2 HOR       | mm/sec | 15.91      | 0 -400 Hz | 800   | 2300 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L2 2300 2 VER       | mm/sec | 39.8       | 0 -400 Hz | 800   | 2300 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L2 2300 2 AXI       | mm/sec | 13.41      | 0 -400 Hz | 800   | 2300 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| Machine M+T L3 2980 RPM |        |            |           |       |          |             |           |
| M+T L3 2980 1 HOR       | mm/sec | 1.889      | 0 -400 Hz | 800   | 2980 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L3 2980 1 VER       | mm/sec | 1.769      | 0 -400 Hz | 800   | 2980 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L3 2980 1 AXI       | mm/sec | 3.96       | 0 -400 Hz | 800   | 2980 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L3 2980 2 HOR       | mm/sec | 4.6        | 0 -400 Hz | 800   | 2980 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L3 2980 2 VER       | mm/sec | 5.372      | 0 -400 Hz | 800   | 2980 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |
| M+T L3 2980 2 AXI       | mm/sec | 4.501      | 0 -400 Hz | 800   | 2980 RPM | Uniform     | 16-Oct-13 |

4.4. ábra A mérési útvonal és a mérőműszer beállításaira utaló példa

## 4.2. A mérési eredmények bemutatása

Fel szeretném hívni a figyelmet, hogy a mérések során összesen  $3 \times 2 \times 5 \times 3 = 90$  frekvenciaspektrumot és időjelet rögzítettem, illetve elemeztem ki. Mivel az összes mérési eredmény bemutatására a dolgozat terjedelme miatt nincs lehetőségem, ezért a mérési eredmények közül a dolgozat szempontjából legfontosabbakat ismertetem.

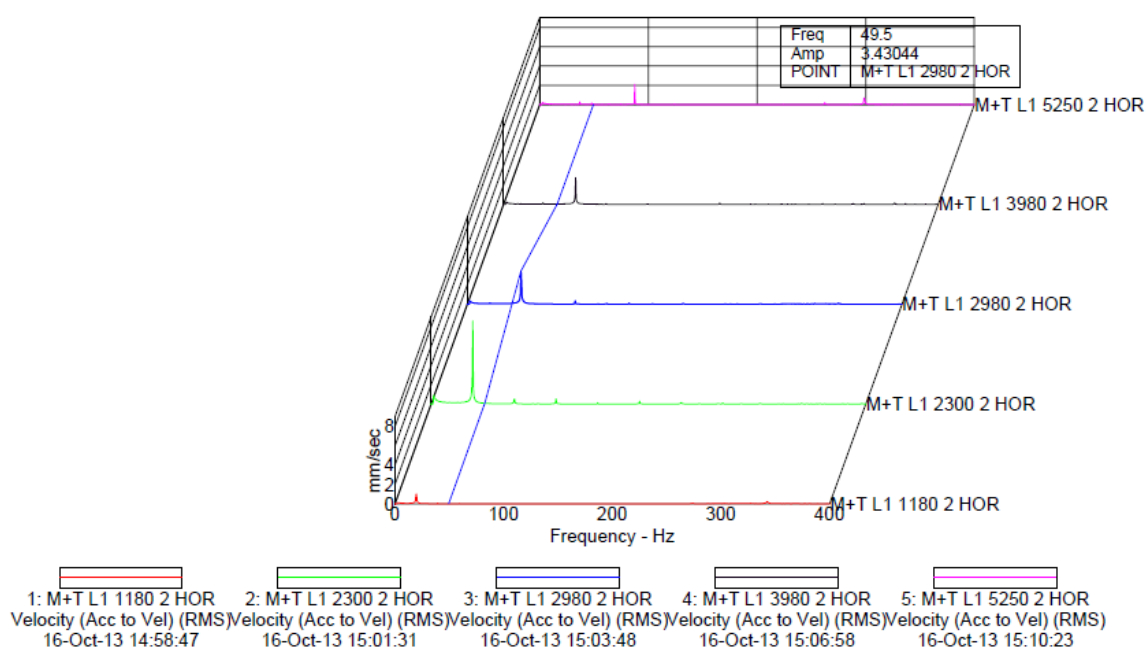
### 4.2.1. Spektrum analízis:

Spektrumok kiértékeléseit a PRISM<sup>4</sup> for Windows alapú adatbázis kezelő szoftver által szolgáltatott Waterfall típusú ábrák segítségével szemléltetem a következő ábrákon. Az ábrák szemléletesen mutatják az adott csapágyakon adott mérési irányban készített spektrumok frekvenciáinak és amplitúdóinak változását.

A 4.5. ábrán látható a 2-es csapágy horizontális irányba felvett spektrumok változását, amelyet az L1-merev alapozásnál készítettem. Az amplitúdó változás a rezonanciában az alaphoz képest kb. 6x nagyobb értéket ér el. A méréssel meghatározott rezonanciafrekvencia értékét a különböző fordulatszámokon a 4.1. táblázat mutatja meg.

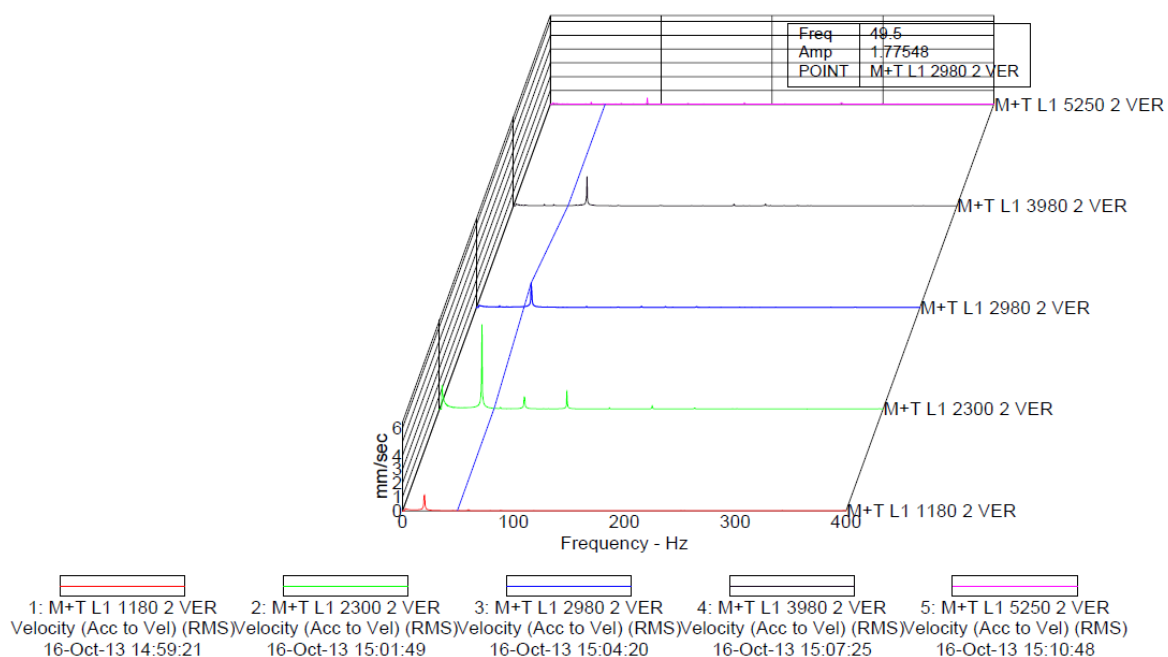
|    | Rezonanciafrekvencia RPM-ben és mm/sec-ban |             |
|----|--------------------------------------------|-------------|
| 1. | 1180 RPM                                   | 1,16 mm/sec |
| 2. | 2300 RPM                                   | 6,12 mm/sec |
| 3. | 2480 RPM                                   | 1,77 mm/sec |
| 4. | 3980 RPM                                   | 2,11 mm/sec |
| 5. | 5250 RPM                                   | 0,46 mm/sec |

**4.1. táblázat A rezonanciafrekvenciák értéke a 2-csapágy, horizontális irányú, merev alapozású spektrumanalízise alapján**



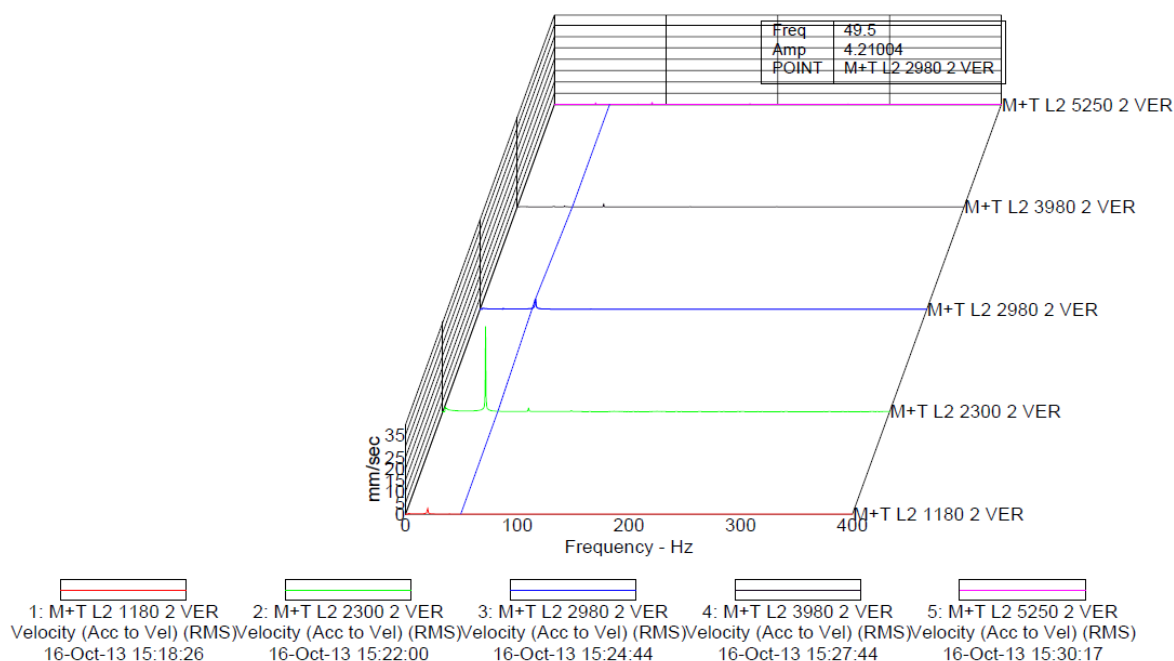
**4.5. ábra Waterfall diagram a 2-es csapágyon, horizontálisan merev alátámasztás esetén**

A 4.6. ábrán az L1- merev láb esetén a vertikális spektrumokat kísérelhetjük figyelemmel.

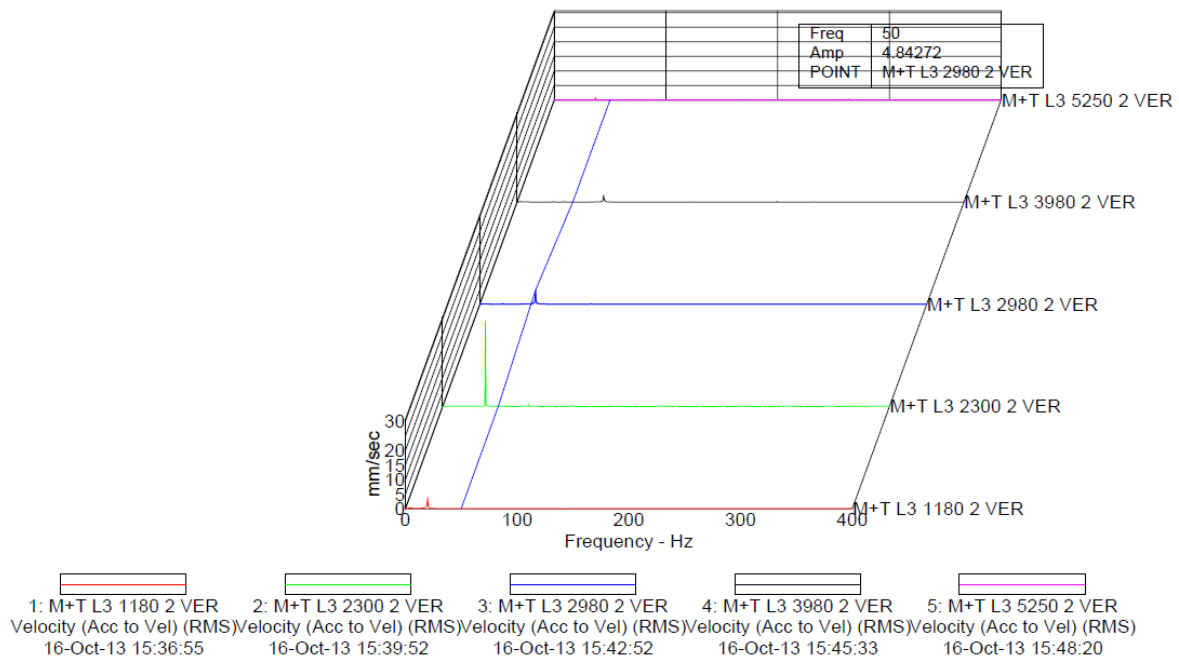


4.6. ábra Waterfall diagram a 2-es csapágyon, vertikálisan merev alátámasztás esetén

A 4.7. ábrán az L2- 55 Shore és a 4.8. ábrán pedig az L3- 45 Shore csillapítású gumibakokkal történt mérési eredményekre mutatok példát.



4.7. ábra Waterfall diagram a 2-es csapágyon, vertikálisan rugalmas 55 Shore alátámasztás esetén

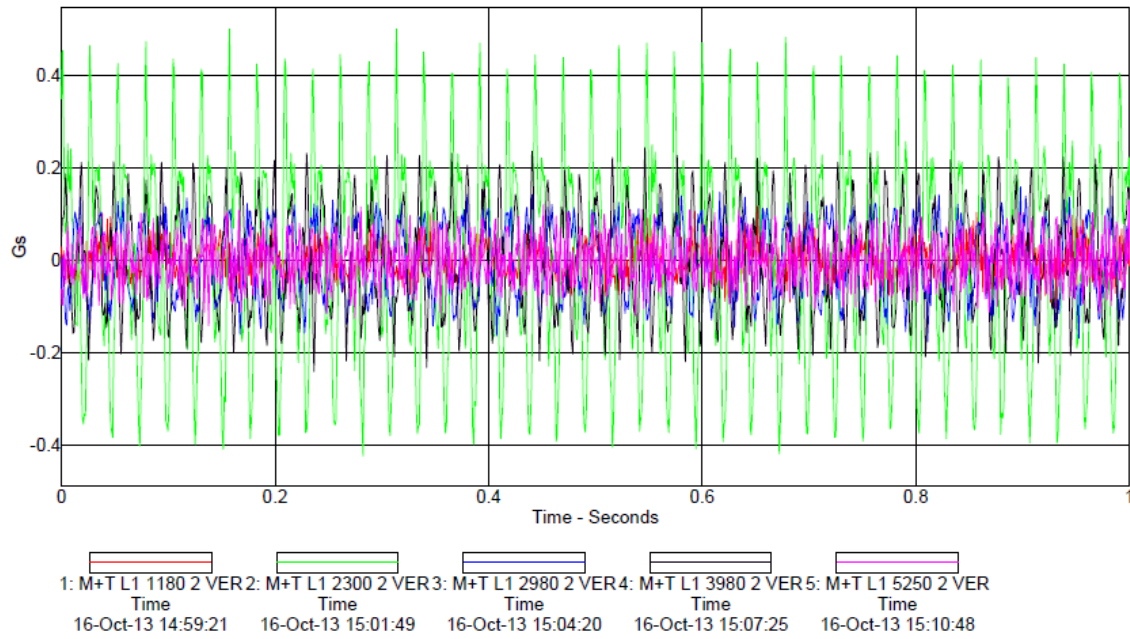


**4.8. ábra** Waterfall diagram a 2-es csapágyon, vertikálisan rugalmas 45 Shore alátámasztás esetén

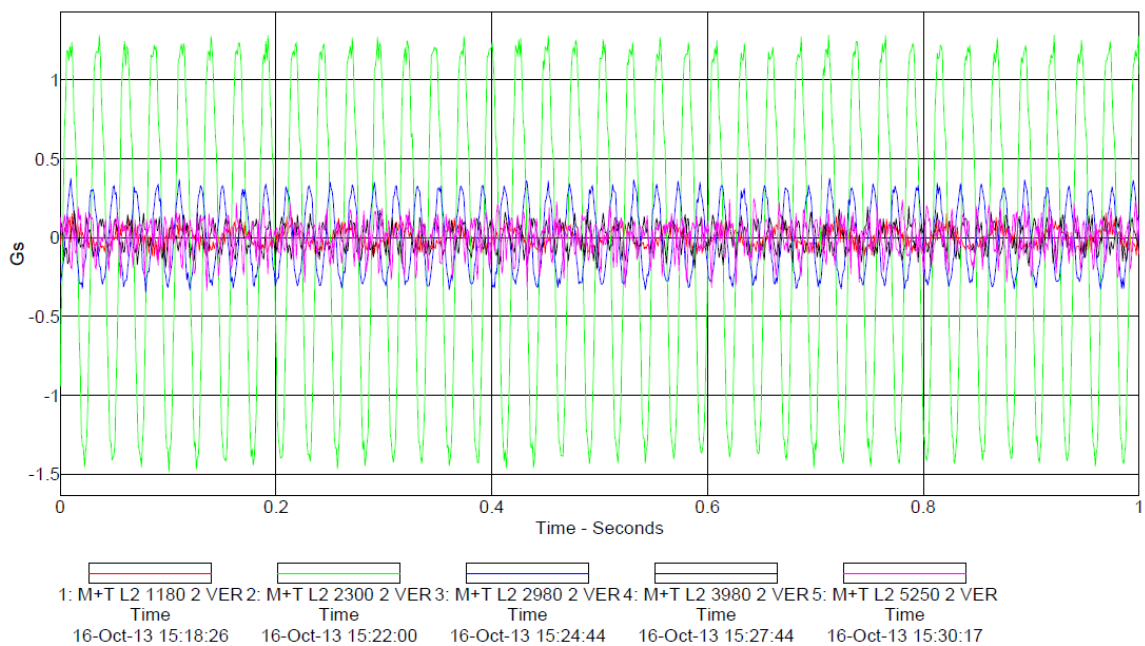
Amplitúdó változásával kapcsolatosan példaként az L1-merev vertikális irányú amplitúdók változását ismertetem. Ezek az értékek az alábbiak szerint alakultak. A gumibakok alkalmazásakor az amplitúdók egyértelmű növekedést mutatnak. Az L2-55 Shore alátámasztás esetében a vertikális mérési eredmény eléri a 38 mm/sec-ot, az L3-45 Shore alátámasztás esetében pedig a 30 mm/sec rezgéssebesség értéket.

#### 4.2.2. Time-Waveform (időjel alak) analízis:

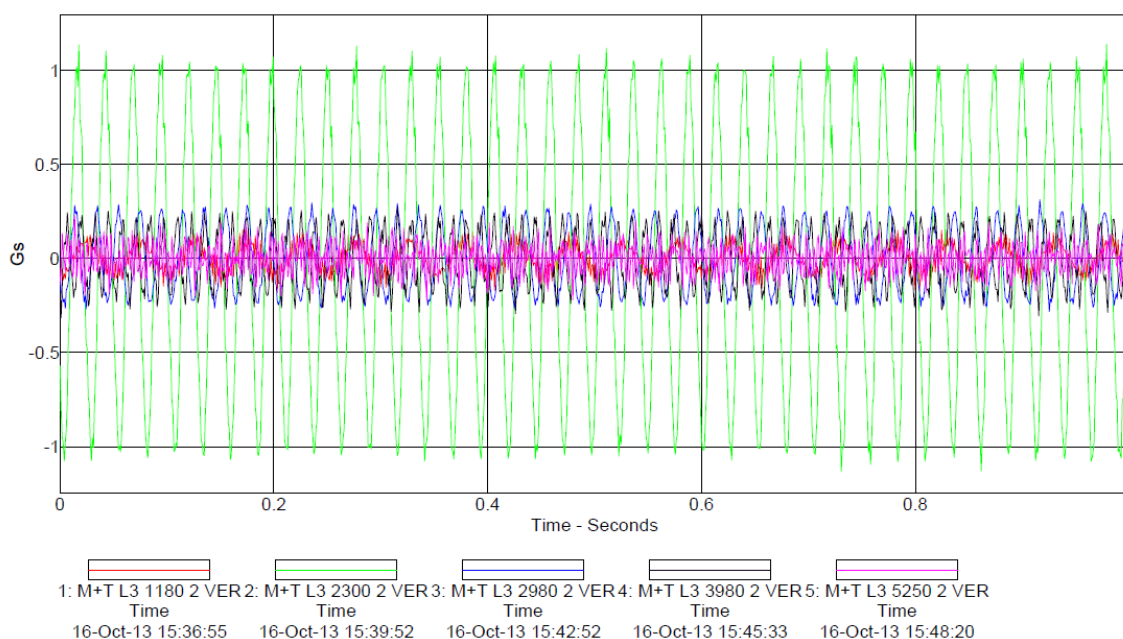
A Time-Waveform, vagyis időjel analízis során az analóg időjelek, az érzékelő által rögzített szinuszos rezgések jelalakja képi a mérési eredményeket. Ezeket a mérési eredményeket egy-egy úgynevezett „Overlay”, egymásra helyezett (szuperponált) időjel segítségével szemléltetem, amelyek a különböző fordulatszámokon az adott láb típus és csapágy hely szerint elkülönítve, különféle színekkel megjelölve láthatók az ábrákon. A mérési eredmények rezgésgyorsulás amplitúdó [g] és periódusidő [msec] formájában állt rendelkezésemre. Az ábrákon zöld színnel jelölve minden esetben kitűnik a rezonanciafrekvencia jelalakja, amely a többi jelből kiemelkedve, szálkás végződéssel jelzi a rezonancia jelenlétét.



4.9. ábra Overlay megjelenítés a 2-es csapágy, vertikális irányú időjeleiből, merev lábak esetén



4.10. ábra Overlay megjelenítés a 2-es csapágy, vertikális irányú időjeleiből, rugalmas 55 Shore alátámasztás esetén



4.11. ábra Overlay megjelenítés a 2-es csapágy, vertikális irányú időjeleiből, rugalmas 45 Shore lábak esetén

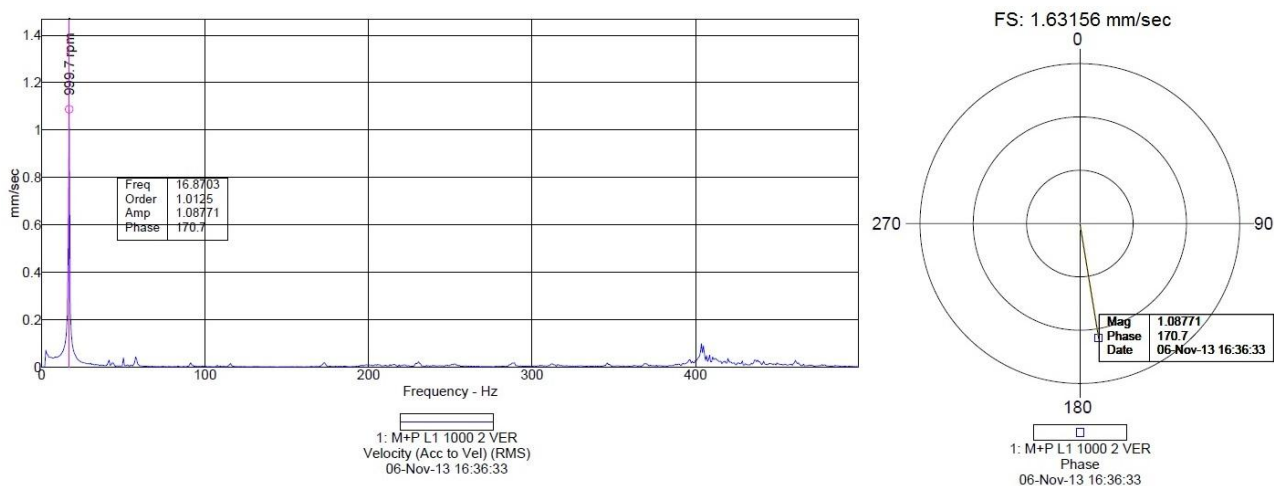
#### 4.2.3. Fázisszög változásának elemzése

Spektrumok fázisszög változásának kiértékeléseit a PRISM<sup>4</sup> for Windows alapú adatbázis kezelő szoftver által szolgáltatott Spektrumkép (balról) és Polár (jobbról) típusú ábrák segítségével szemléltetem a következő ábrákon. A mért értékek elemzésekor megállapítottam, hogy a vizsgálat szempontjából az axiális irányú, valamint a 3200 RPM feletti adatok elhanyagolhatók. A szelektálásból maradt mért amplitúdó és fázisszög értékeket a 4.2. táblázat tartalmazza.

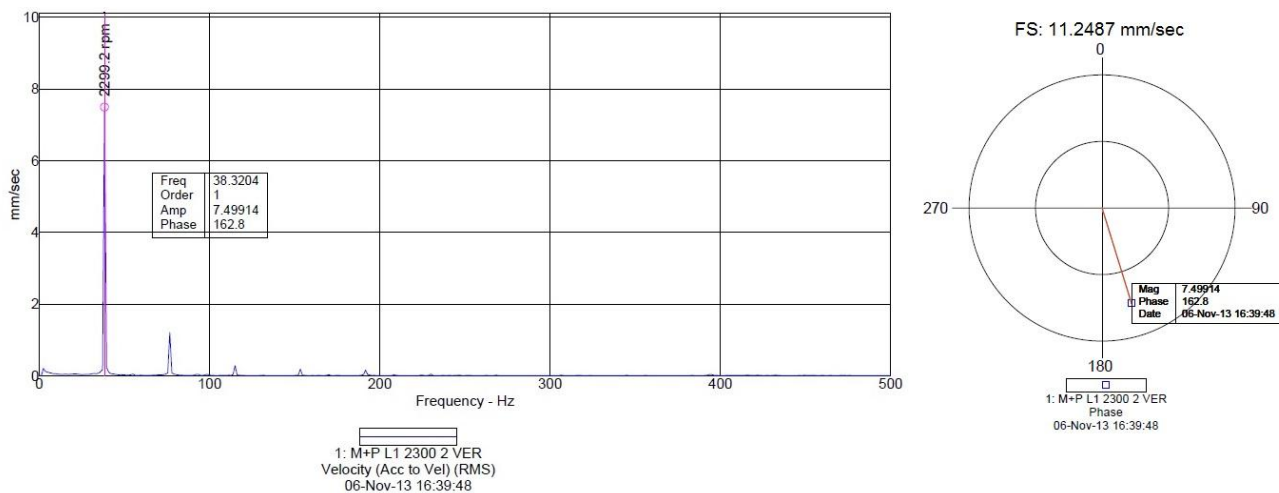
|      |               | L1 Merev láb |             |             | L2 SH 55    |             |             | L3 SH 45    |             |             |
|------|---------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|      |               | 1000<br>RPM  | 2300<br>RPM | 3200<br>RPM | 1000<br>RPM | 2300<br>RPM | 3200<br>RPM | 1000<br>RPM | 2300<br>RPM | 3200<br>RPM |
| 1H1X | Amp. [mm/sec] | 1,53         | 6,9         | 0,93        | 1,34        | 6,51        | 0,3         | 1,2         | 6,36        | 0,58        |
|      | Fázis [°]     | 7,7          | 157         | -58         | 165         | 112         | -80         | 173         | 107         | -79         |
| 1V1X | Amp. [mm/sec] | 1,49         | 8,76        | 0,43        | 0,57        | 6,53        | 1           | 0,57        | 7,89        | 1,01        |
|      | Fázis [°]     | -174,9       | -64         | 170         | 74          | -82         | -27         | 103         | -102        | 8,8         |
| 2H1X | Amp. [mm/sec] | 1,25         | 13,9        | 4,76        | 0,72        | 19,4        | 2,25        | 0,59        | 17,48       | 2,63        |
|      | Fázis [°]     | 3,3          | 111         | -9,4        | 125         | 121         | -49         | 124         | 124         | -51         |
| 2V1X | Amp. [mm/sec] | 1,08         | 7,49        | 2,82        | 0,76        | 12,5        | 4,45        | 0,71        | 7,23        | 4,84        |
|      | Fázis [°]     | 170          | 163         | -2,8        | 95          | -123        | -10         | 104         | -96         | 3,5         |

4.2. táblázat Fázisszög változások elemzése a spektrumban

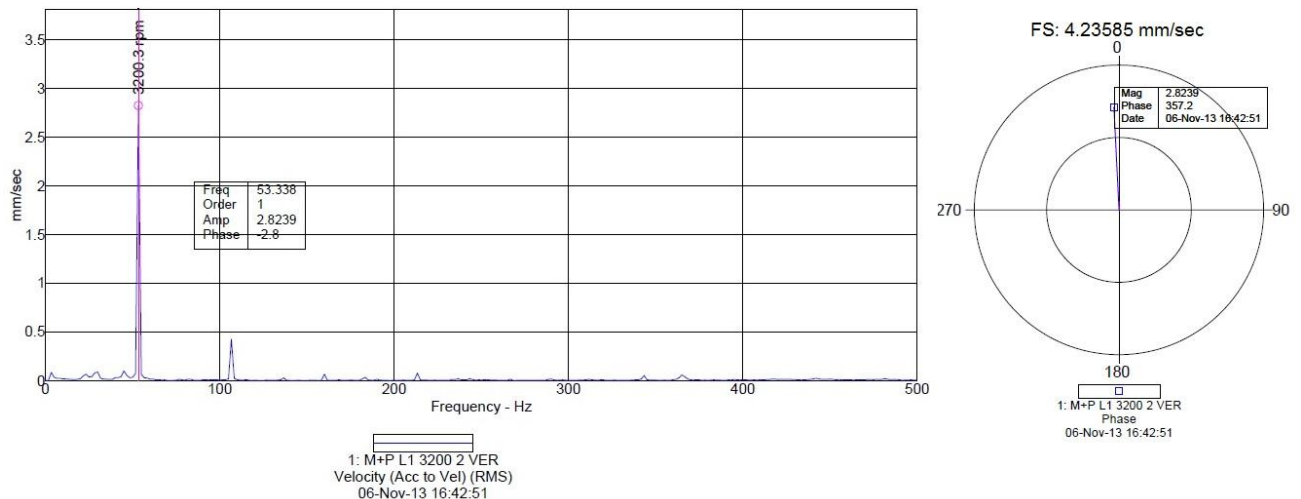
Az elemzés során megvizsgáltam a többi felharmonikust is, de csak az első felharmonikusnál mutatható ki a fázisszög változás. Az alábbi ábrák szemléletesen mutatják az adott csapágyakon vertikális és horizontális irányban készített fázisszög változását.



4.12. ábra Spektrum és Polár kép az első felharmonikusnál, 1000 RPM-ben, a 2-es csapágyon, vertikálisan, merev alátámasztás esetén



4.13. ábra Spektrum és Polár kép az első felharmonikusnál, 2300 RPM-ben, a 2-es csapágyon, vertikálisan, merev alátámasztás esetén



4.14. ábra Spektrum és Polár kép az első felharmonikusnál, 3200 RPM-ben, a 2-es csapágyon, vertikálisan, merev alátámasztás esetén

### 4.3. Megállapítások a mérési eredmények alapján

A spektrális változások kimutatása érdekében végzett mérésekből az alábbi megállapítások tehetők:

- A rezgés-spektrumok határozottan és egyértelműen mutatják a frekvencia és a rezgésebbesség amplitúdó változását a különféle alátámasztások és fordulatszámok esetén.
- A rezgésebbesség amplitúdók elemzése során azt állapítottam meg, hogy az 1-es csapágyon mindkét irányban alacsonyabb, ennek megfelelően a 2-es csapágyon körülbelül 2-szer magasabb rezgésebbesség diagnosztizálható. Ennek oka a mérőpad felépítésével, azaz a 2-es csapágnak a mérőpad súlypontjából vett nagyobb távolságával magyarázható. A nagyobb erőkaron magasabb rezonancia alakul ki.
- A rezonanciában tapasztalható amplitúdó a merev alapozással a legalacsonyabb, ezt követi a 45 Shore, majd a legmagasabb értékek az 55 Shore keménységű láb esetén diagnosztizálhatók.

**Megállapítások az időjel analízis alapján:**

- Az időjel alak vizsgálat egyszerre történik a spektrum analízissel. Mivel a frekvencia spektrum és az idő jelalakok egymással összefüggnek, ezért megállapításaim és következtetésem is hasonlóak a spektrum analíziséhez.

- Az idő jelalak mérési eredményei a periodikus idő (a frekvencia reciproka  $T=1/f$ ;  $f=1/T$ ) és a rezgésgyorsulás eredmények alátámasztják a frekvencia spektrum elemzésénél leírtakat. Az időjel alakokban a rezonancia megjelenése a spektrum analízishez hasonlóan szemléletesen kimutatható.

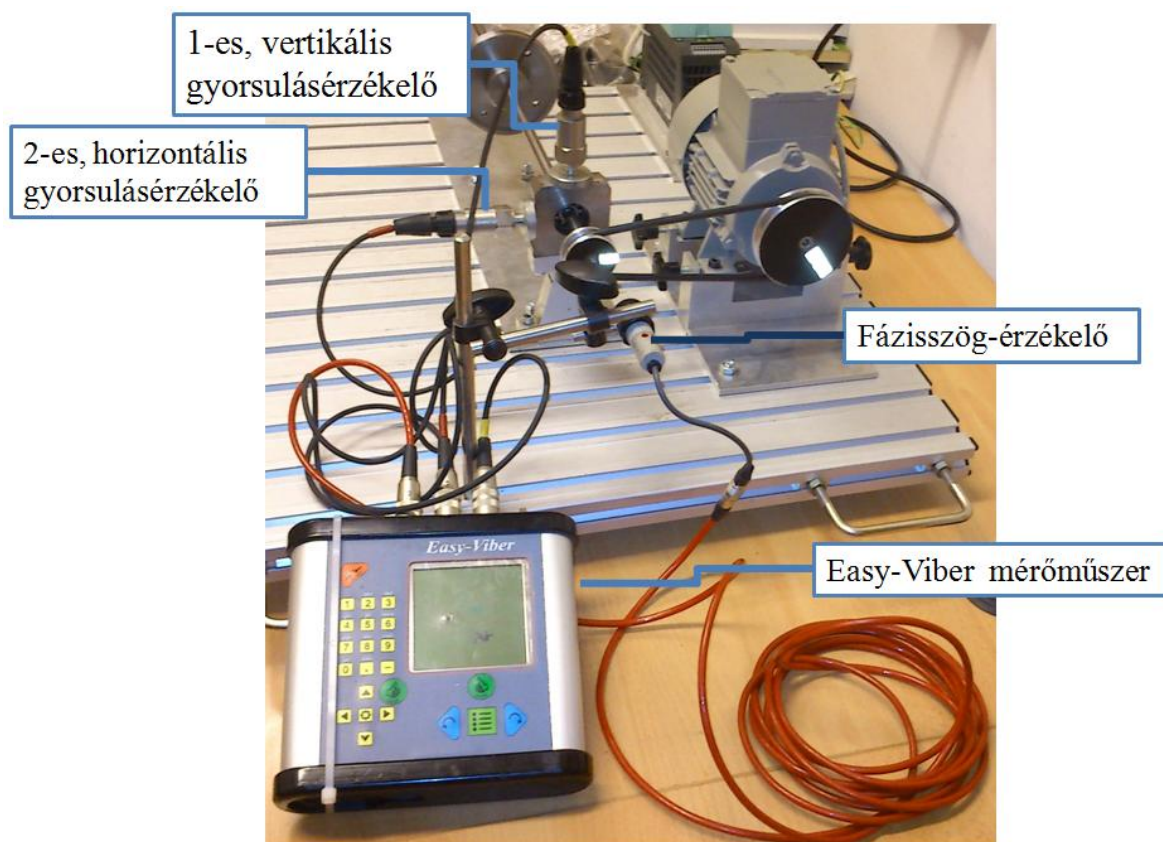
**Megállapítások a spektrumok fázisszög változásának kiértékelése alapján:**

- A vizsgálattal meghatározott rezonanciafrekvencia határozottan mutatja a fázisszög változást, amely a szakirodalom szerint a rezonancia, illetve a sajátfrekvencia jelenlétének biztos mutatója. (Ahogy azt a 2. fejezetben a 2.6.ábra is mutatja)
- A spektrumok fázisszög változásnál a rezonancia megjelenése a spektrum és az időjel alak analízishez hasonlóan szemléletesen kimutatható

## 5. Rezonancia kimutatása kifutási vizsgálattal

### 5.1. A mérési körülmények

A kifutási vizsgálat során a rezgésspektrum és időjel analízishez hasonlóan a rezgés-amplitúdót és a fázisszöget vizsgáltam. Ennek a vizsgálatnál, már egy másik mérőberendezés használata volt az optimális, az Easy-Viber rendszer. Ugyanis az Easy-Viber mérőműszer alkalmazása esetén lehetőségem volt két mágneses rögzítésű gyorsulásérzékelő egyidejű használatára, mely nagyban megkönnyítette, és gyorsabbá tette a méréseket. A mérési összeállítást a 5.1. ábra szemlélteti.

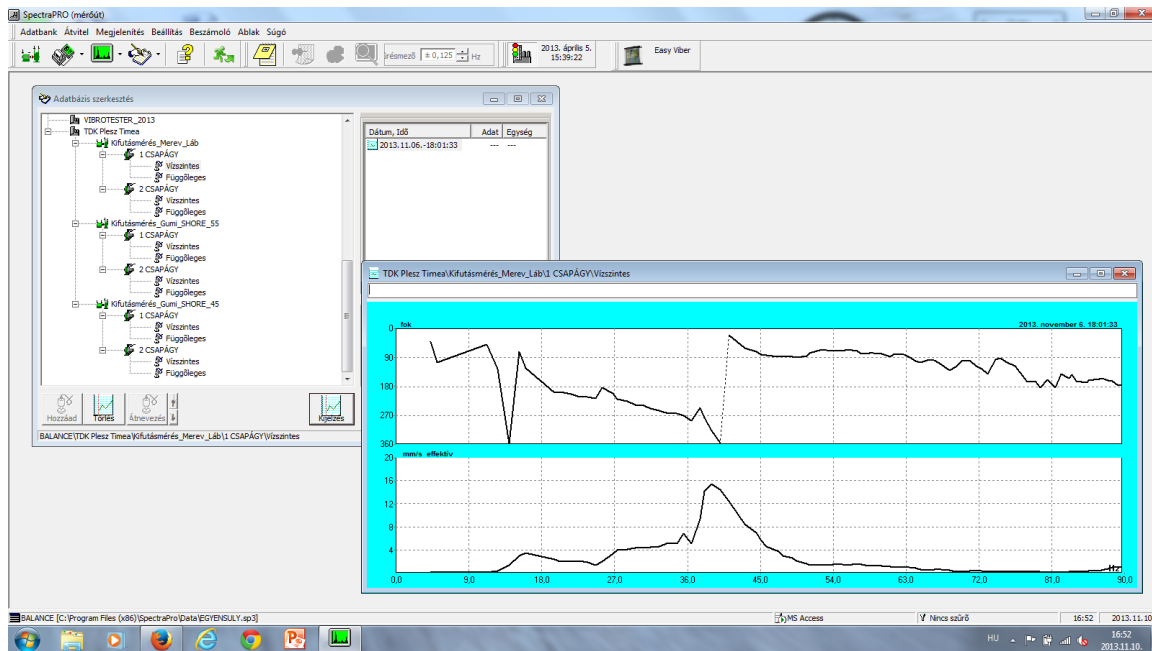


5.1. ábra A kifutási vizsgálat mérési összeállítása

A kifutási vizsgálatot a következőképpen végeztem: a hajtómotort felpörgettem 5400 ford/percre, majd leállítottam a motort, melynek következtében a tengely körülbelül 10-15 másodperc alatt teljesen megállt. Ez idő alatt az érzékelők rögzítették az amplitúdó, fordulatszám és fázisszög értékeket.

A mérés során az Easy-Viber rezgés-analizátor segítségével egyazon időben két mérési irányban (vízszintesen és függőlegesen) rezgésebbesség és fázisszög adatokat rögzítettem,

melyet mindkét csapágyon (1-es és 2-es), valamint mind a három különböző csillapítási tényezővel rendelkező alapon megmértem.



5.2. ábra A SpektraPro szoftver képernyője

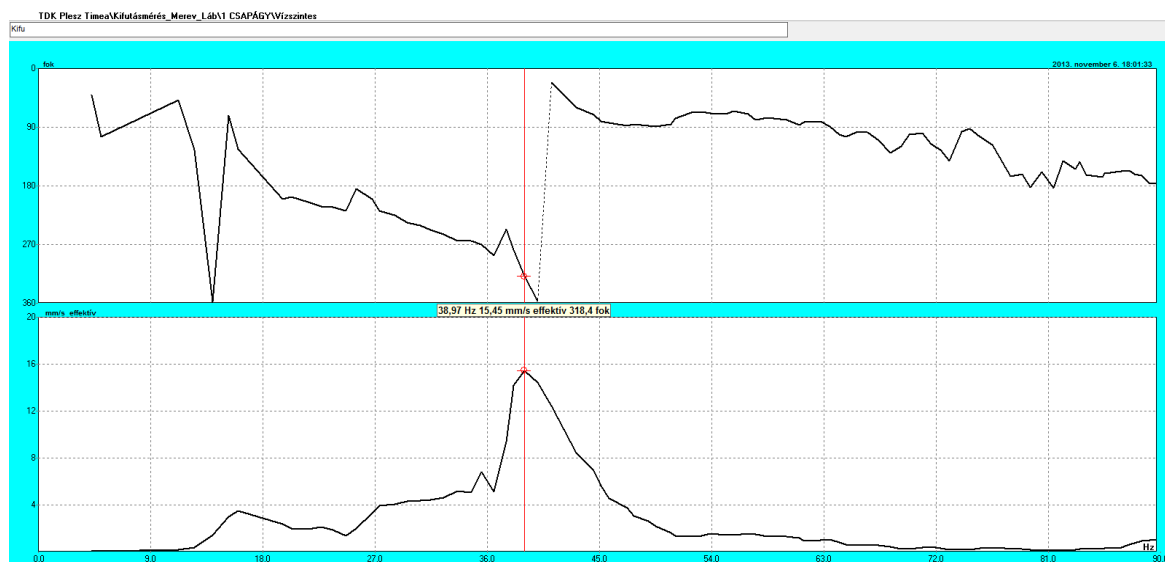
A mérési értékeket a mérőműszer tárolja, és a későbbiekben az adatokat betöltöttem a SpektraPro adatbázis kezelőprogramba, ahol lehetőség van az úgynevezett Bode-diagram formájában elemezni a rezgésebbesség-fordulatszám, illetve a fázisszög-fordulatszám változását. A SpektraPro szoftver képernyőjén a következő adatok láthatók (lásd 5.2. ábra):

- a mérési adatbázis felépítése,
- a mérés időpontja,
- a mérési eredmény Bode-diagram formátumban.

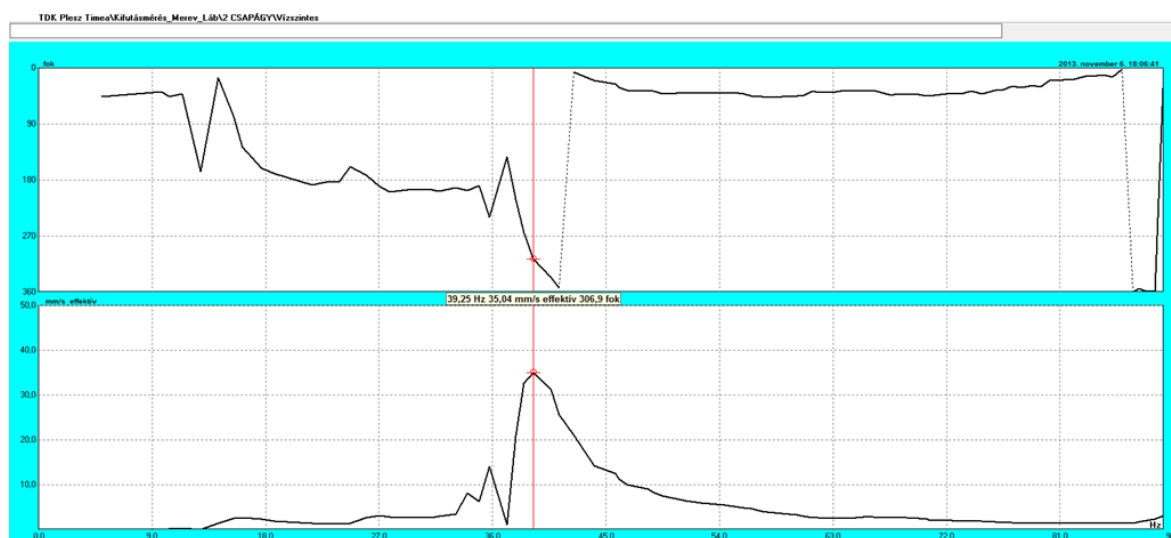
## 5.2. A mérési eredmények bemutatása

Mivel a dolgozat terjedelme mind a 12 féle diagram bemutatását nem teszi lehetővé, ezért itt csak a dolgozat szempontjából fontos Bode-diagramokat szemléltettem. A mérési eredmények mindkét csapágyon és mindkét mérési irányban hasonló eredményeket mutattak, ezért a következő ábrákon a legjellegzetesebb kifutás vizsgálati eredmények láthatók. A mérési eredmények értékelésénél a fázisszög váltás közelében lévő legmagasabb amplitúdó frekvenciáját vettem figyelembe.

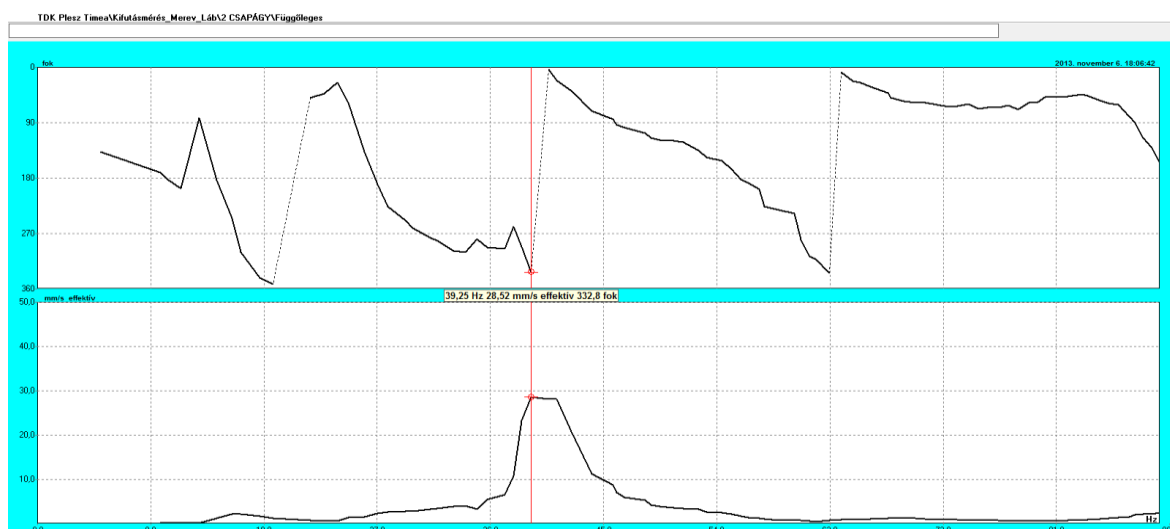
A különféle alátámasztásokkal végzett kifutási vizsgálatok eredményeit táblázatosan foglalom össze, a jellegzetes kifutás-mérési eredmények a következő 6 db ábrán kísérelhetők figyelemmel.



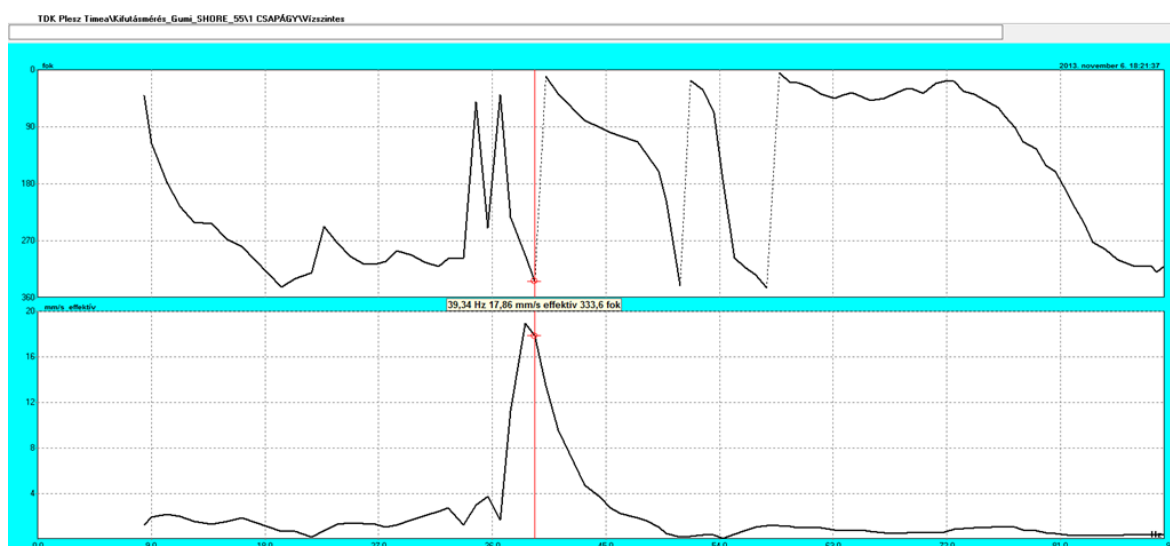
5.3. ábra Az 1-es csapágó vízszintes irányú kifutás vizsgálati Bode-diagrammja merev alátámasztás esetén



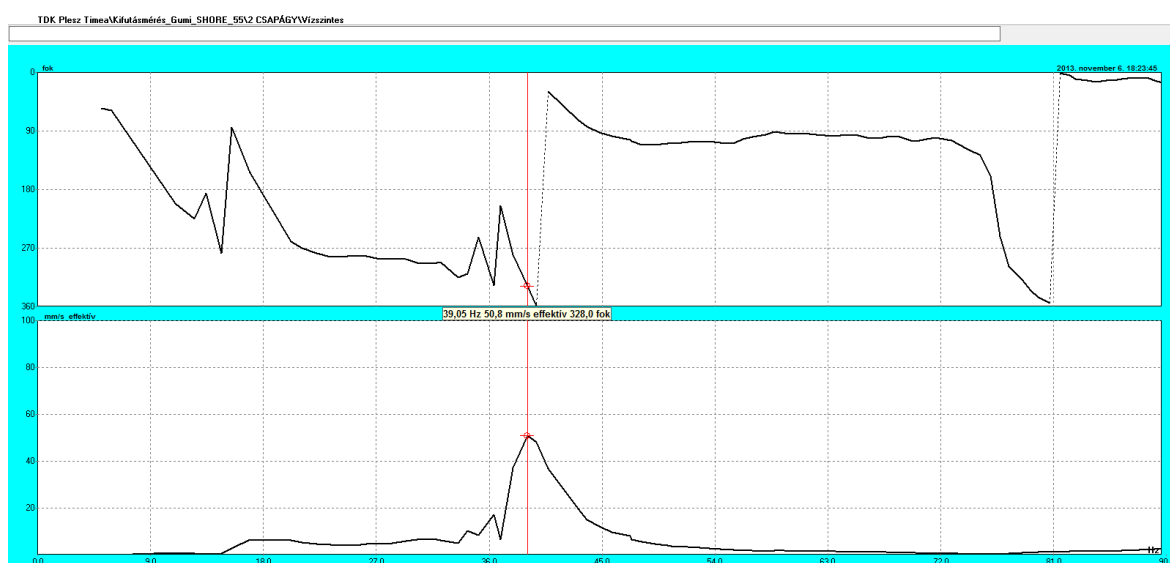
5.4. ábra A 2-es csapágó vízszintes irányú kifutás vizsgálati Bode-diagrammja merev alátámasztás esetén



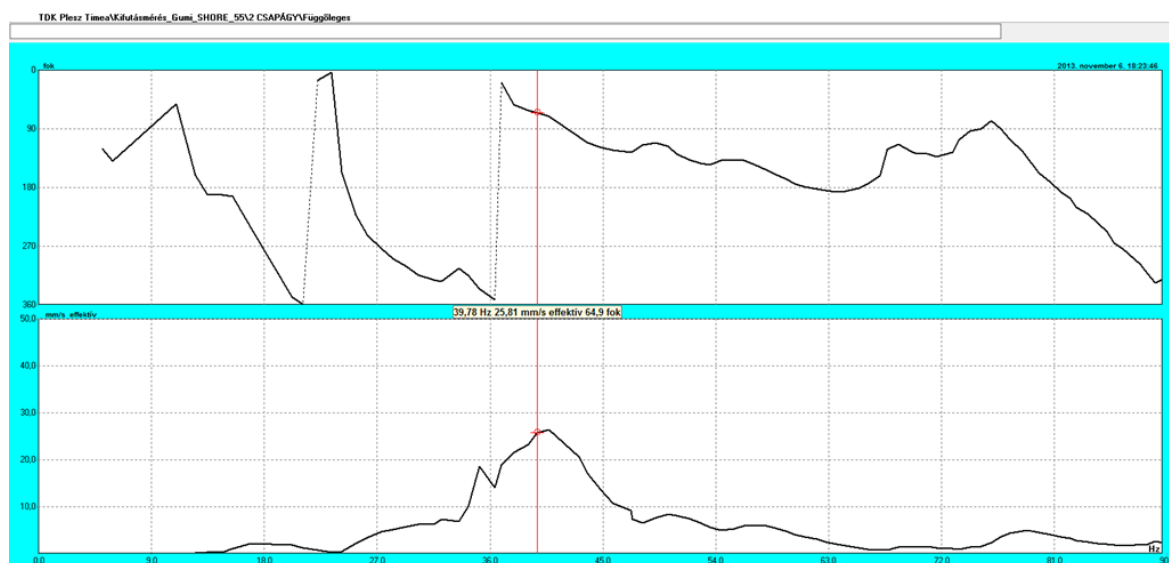
5.5. ábra A 2-es csapágy függőleges irányú kifizás vizsgálati Bode-diagrammja merev alátámasztás esetén



5.6. ábra A 1-es csapágy vízszintes irányú kifizás vizsgálati Bode-diagrammja 55 Shore rugalmas alátámasztás esetén



5.7. ábra A 2-es csapágy vízszintes irányú kifizás vizsgálati Bode-diagrammja 55 Shore rugalmas alátámasztás esetén



5.8. ábra A 2-es csapágy függőleges irányú kifizási vizsgálati Bode-diagramja 55 Shore rugalmas alátámasztás esetén

A mérési eredmények kiértékelésénél az ábrákon piros vonallal jelölt, fázisszög változás közelében mérhető legmagasabb amplitúdók frekvenciáját vettem figyelembe.

| Alátámasztás típusa      | Sajátfrekvencia [Hz] és a maximális amplitúdó [mm/sec] |                          |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                          | 1-es csapágy                                           |                          | 2-es csapágy             |                          |
|                          | Vízszintes                                             | Függőleges               | Vízszintes               | Függőleges               |
| Merev láb                | 38,97 Hz<br>15,45 mm/sec                               | 38,10 Hz<br>22,32 mm/sec | 39,25 Hz<br>35,04 mm/sec | 39,25 Hz<br>28,52 mm/sec |
| Rugalmas láb<br>55 Shore | 38,6 Hz<br>18,93 mm/sec                                | 35,65 Hz<br>5,57 mm/sec  | 39,05 Hz<br>50,08 mm/sec | 39,78 Hz<br>25,81 mm/sec |
| Rugalmas láb<br>45 Shore | 38,82 Hz<br>19,28 mm/sec                               | 35,34 Hz<br>8,61 mm/sec  | 39,57 Hz<br>49,7 mm/sec  | 40,66 Hz<br>31,46 mm/sec |

5.1. táblázat Összehasonlító táblázat a kifizésvizsgálat eredményeiről

Előzetesen számítással is meghatároztam a sajátfrekvencia értékét, mely úgy 2083 RPM, azaz **34,72 Hz** lett.

### 5.3. Megállapítások a mérési eredmények alapján

**A kifutás vizsgálat alapján az alábbi megállapítások fogalmazhatók meg:**

- A kifutás vizsgálattal meghatározott rezonanciafrekvencia mindkét csapágyon mindkét irányban határozottan mutatja a fázisszög változást és a rezgéssebesség amplitúdó megnövekedését, ahogy ez a spektrum és időjel analízisnél is kimutatható volt.
- Megállapítható, hogy a számított  $2083 \text{ RPM} = 34,72 \text{ Hz}$  –hez képest szinte minden mérési eredmény  $38\text{-}39 \text{ Hz}$  körüli értéken mutatja a rezonancia helyét, amely hozzávetőleg  $10\%$ -os eltérést eredményez a számított értékhez képest.
- Megállapítható, hogy a merev alátámasztáshoz képest a rugalmas lábak esetén a rezonanciafrekvencia minimális eltérést mutat.
- Megállapítom, hogy vízszintes és függőleges irányú mérésekkel kimutatható sajátfrekvenciákban merev láb esetén minimális eltérés van, a rugalmas lábak esetén függőlegesen körülbelül  $10\%$  különbség mutatható ki.
- A 2-es csapágyon mérhető amplitúdók itt is magasabb értékeket mutatnak az 1-es csapágyon mérhetőknél, ez itt is a súlypont távolsággal magyarázható.

## 6. Rezonancia kimutatása kalapácsütéssel, vagyis „Bump” teszttel

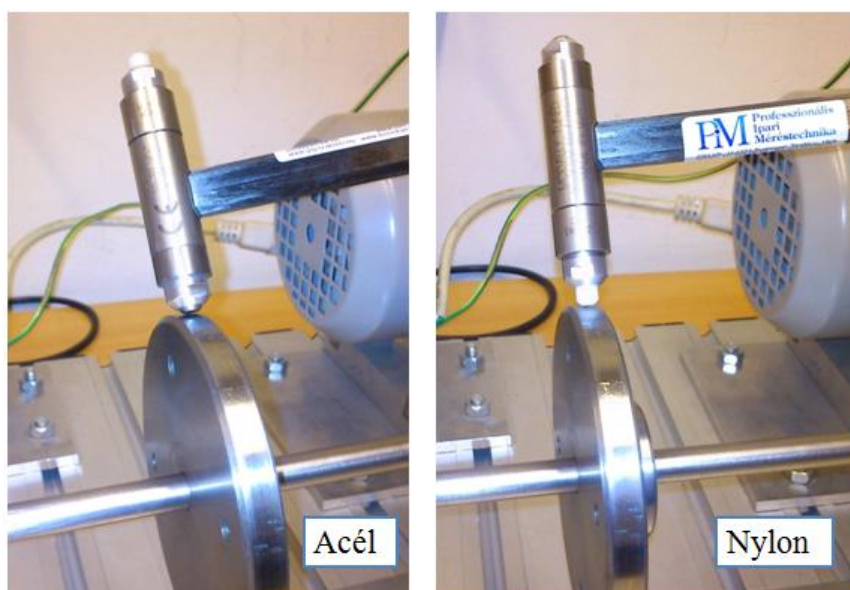
### 6.1. A mérési körülmények

A kalapácsütés, vagy más néven a „Bump” tesztet a rezgésspektrum és időjel analízishez hasonlóan a MICROLOG mérőrendszer segítségével végeztem. A mérések elvégzéséhez szükségem volt egy igen speciális és drága eszközre, egy impulzus kalapácsra, melyet a 6.1. ábra szemléltet. Ezzel az eszközzel tulajdonképpen a gerjesztési erő nagyságát mérjük.



6.1. ábra A "Bump" tesztnél alkalmazott kalapács

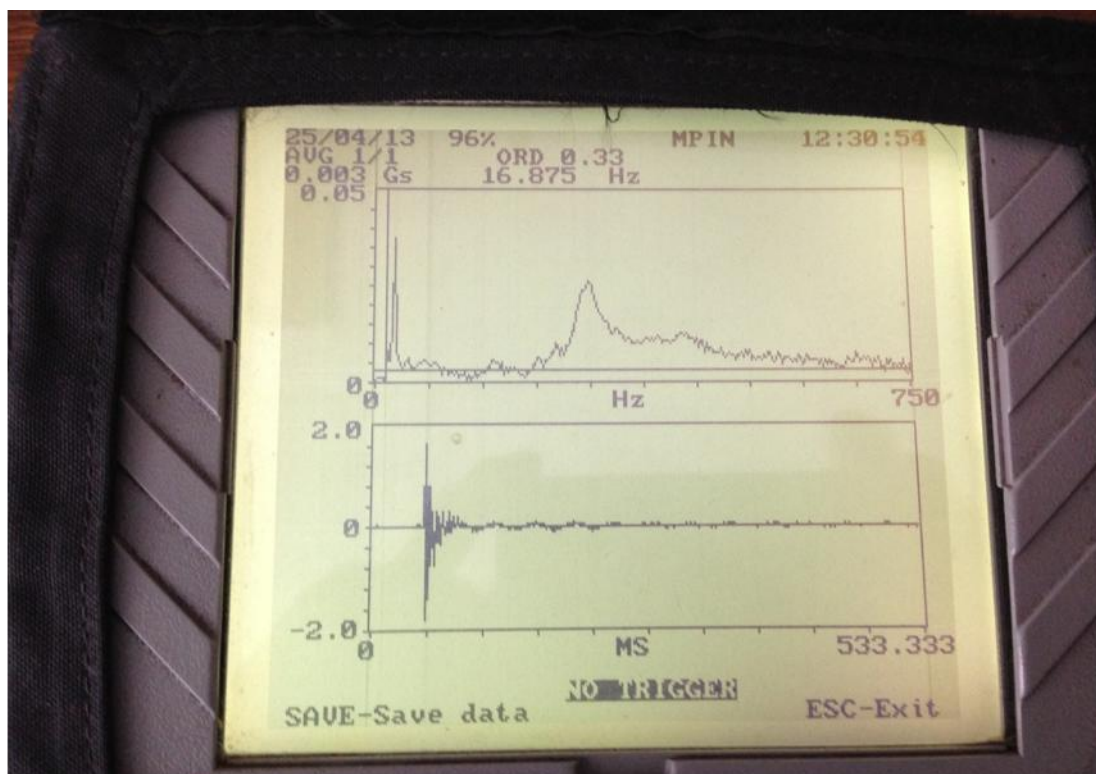
A kalapácsütés tesztek során a horizontális és vertikális irányú rezonanciákat vizsgáltam az 1-es és a 2-es csapágyon kétféle anyagú (acél és nylon) kalapácsfej alkalmazásával. A kétféle kalapácsfejet a 6.2. ábra mutatja meg.



6.2. ábra A két különböző anyagú kalapácsfej

A kalapácsütés tesztet álló helyzetben és csak egyféle alátámasztással (merev alátámasztással) vizsgáltam.

A kalapácsütés teszt végrehajtásának menete a következő: A gyorsulásérzékelőt és a kalapácsot összekötöttem a MICROLOG rezgés-analizátorral. A piezo-elektromos gyorsulásérzékelőt mágnesesen a csapágyházra helyeztem horizontális, majd vertikális irányban, ezek után a kalapáccsal az érzékelő helyzetével megegyező irányban ütésekert hajtottam végre a tárcsán. Az ütések alatt a rezgés-analizátor egyszerre rögzítette a kalapács által létrehozott ütés impulzus időjelét és a szerkezet által válaszként adott rezgésspektrumot. Ennek megfelelően a mérési eredmények egy-egy rezgés gyorsulás időjel és egy rezgés gyorsulás frekvencia spektrum formájában állt a rendelkezésemre, ahogy azt a 6.3 ábra is mutatja.



6.3. ábra Példa a MICROLOG műszer képernyőjén kapott "Bump" teszt mérési eredménye

## 6.2. A mérési eredmények bemutatása

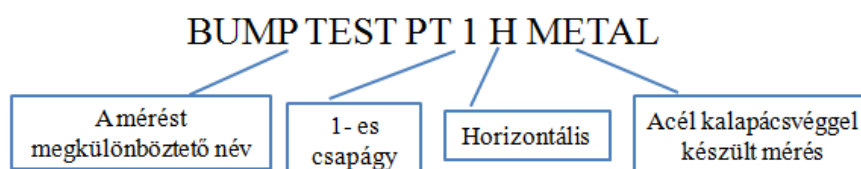
A kalapácsütés tesztek során összesen 8 db idő és frekvencia spektrumot rögzítettem, melyeket összefoglaló módon a 6.1. táblázatán kísérhetünk figyelemmel. Az ábra a mérési beállításokat is tartalmazza, mivel az összes mérési eredmény bemutatására nincs lehetőség,

ezért részletesen a mérési eredmények közül a dolgozat szempontjából legfontosabbakat ismertetem.

| ID                       | Units | Last Value | Frequency  | Detection | Lines | Window Type | Date      |
|--------------------------|-------|------------|------------|-----------|-------|-------------|-----------|
| Machine BUMP TEST PT TDK |       |            |            |           |       |             |           |
| BUMP TEST PT 1H METAL    | Gs    | 0.344      | 0 -2000 Hz | Peak      | 800   | Uniform     | 06-Nov-13 |
| BUMP TEST PT 1V METAL    | Gs    | 0.2955     | 0 -2000 Hz | Peak      | 800   | Uniform     | 06-Nov-13 |
| BUMP TEST PT 2H METAL    | Gs    | 0.2551     | 0 -2000 Hz | Peak      | 800   | Uniform     | 06-Nov-13 |
| BUMP TEST PT 2V METAL    | Gs    | 0.385      | 0 -2000 Hz | Peak      | 800   | Uniform     | 06-Nov-13 |
| BUMP TEST PT 1H NYLON    | Gs    | 0.5497     | 0 -2000 Hz | Peak      | 800   | Uniform     | 06-Nov-13 |
| BUMP TEST PT 1V NYLON    | Gs    | 0.4827     | 0 -2000 Hz | Peak      | 800   | Uniform     | 06-Nov-13 |
| BUMP TEST PT 2H NYLON    | Gs    | 0.6632     | 0 -2000 Hz | Peak      | 800   | Uniform     | 06-Nov-13 |
| BUMP TEST PT 2V NYLON    | Gs    | 0.6413     | 0 -2000 Hz | Peak      | 800   | Uniform     | 06-Nov-13 |

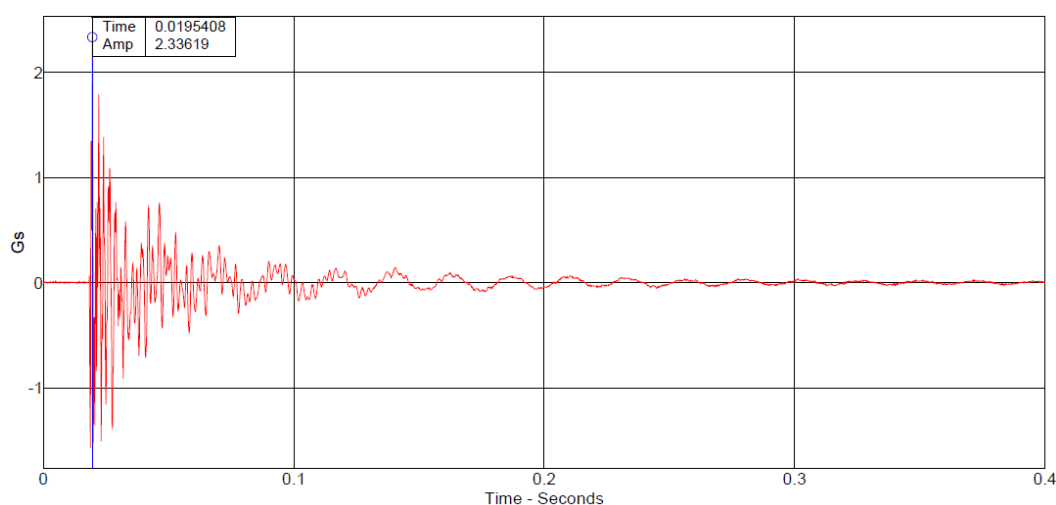
6.1. táblázat A kalapácsütés teszt során rögzített mérések

A mérési hely és irány az „ID” oszlopban látható, és ez alapján azonosítható be a mérés. Például szolgál a 6.4. ábra.

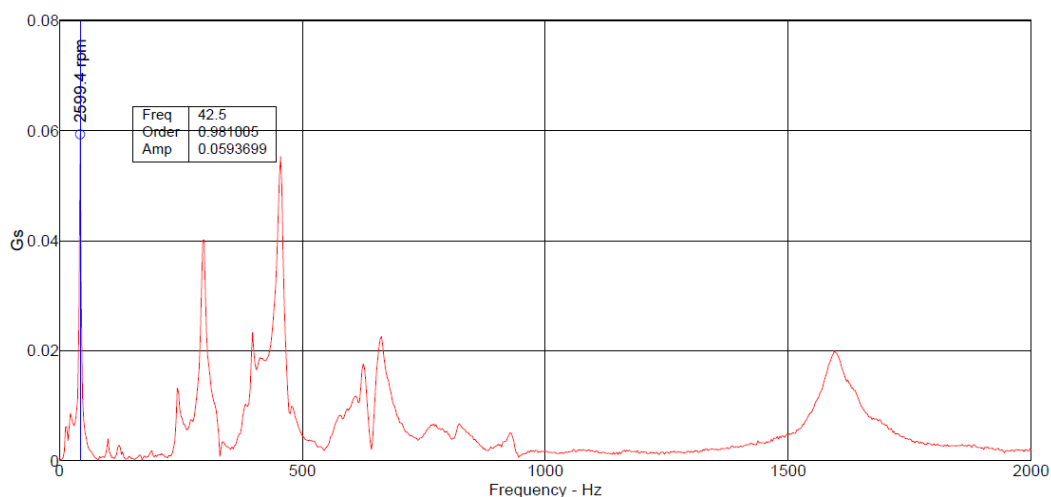


6.4. ábra A mérési azonosítók logikai rendjének bemutatása

A 6.5. ábra a 2-es csapágó acél kalapácsvéggel készített horizontális ütésjelét, a 6.6. ábrán a frekvencia spektrumát kísérelhetjük figyelemmel.

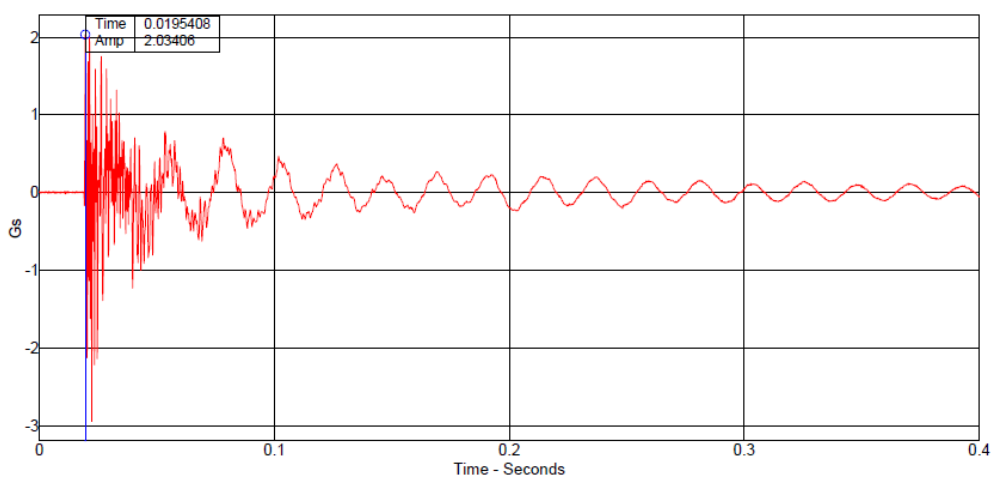


6.5. ábra A 2-es csapágó acél kalapácsvéggel készített horizontális irányú ütés impulzus jele

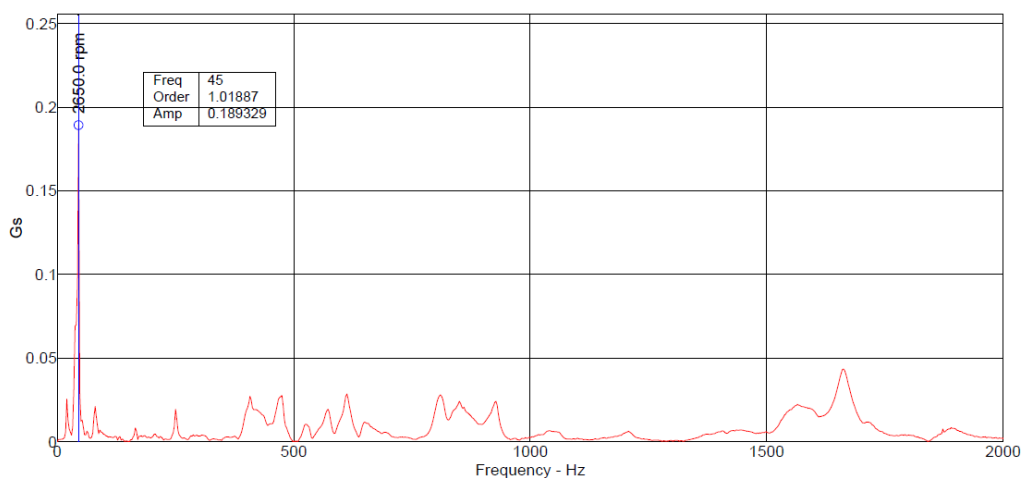


**6.6. ábra A 2-es csapágó acél kalapácsvéggel készített horizontális frekvencia spektruma**

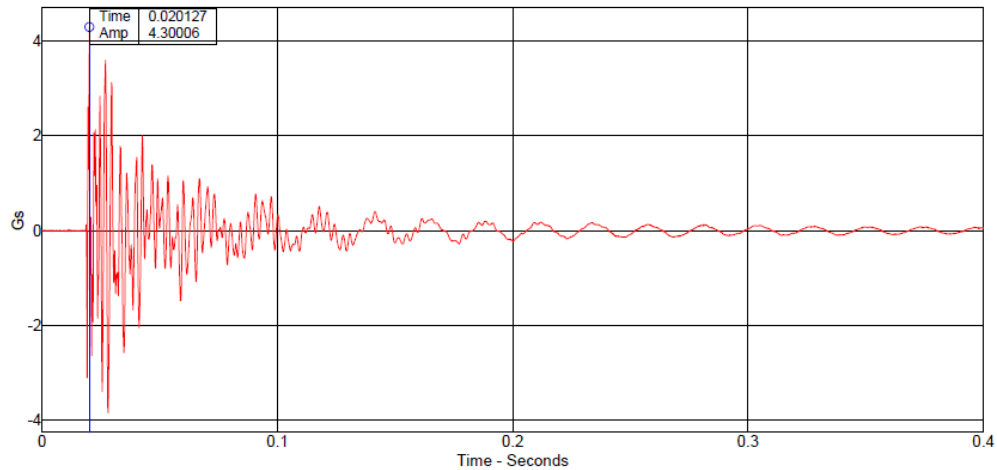
A következő ábrákon a 2-es csapágó további horizontális és vertikális mérési eredményeit kísérelhetjük figyelemmel, melyeket acél és nylon kalapácsvég segítségével készítettem.



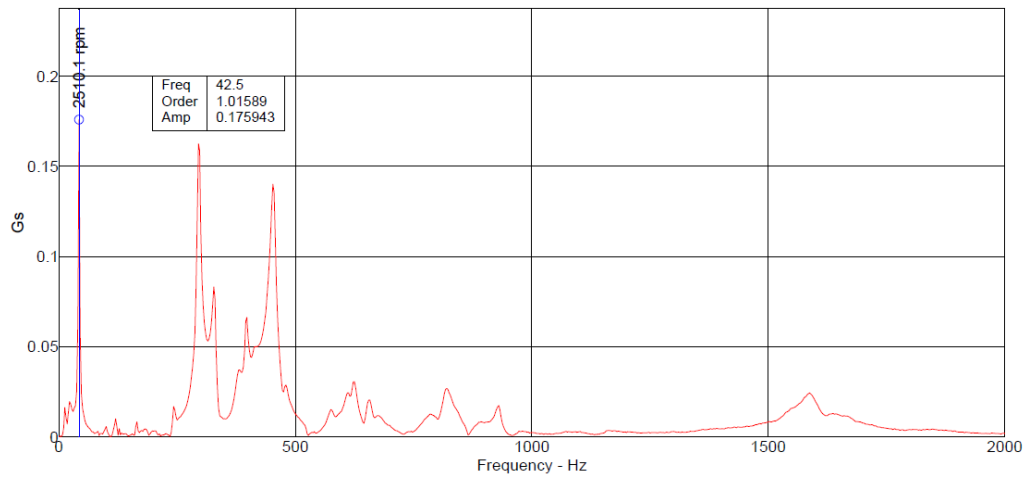
**6.7. ábra A 2-es csapágó acél kalapácsvéggel készített vertikális ütés impulzus jele**



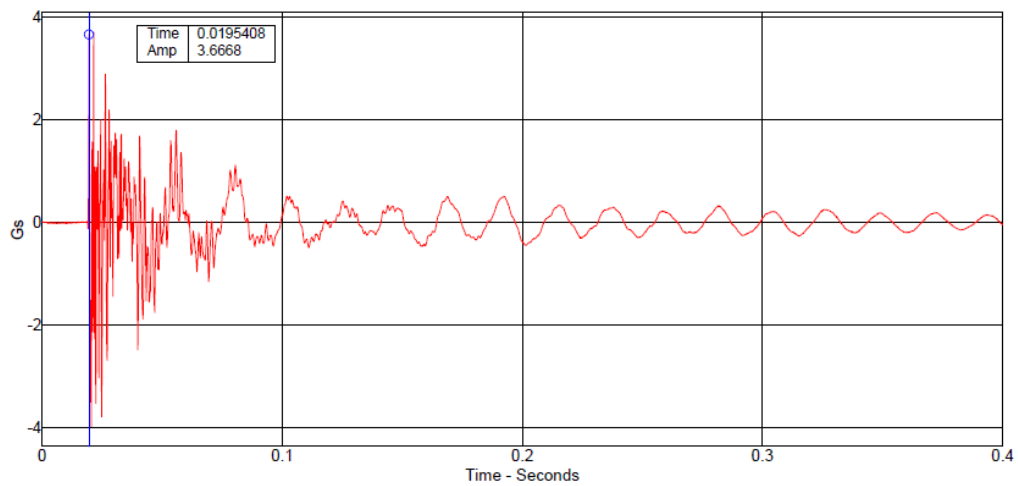
**6.8. ábra A 2-es csapágó acél kalapácsvéggel készített vertikális frekvencia spektruma**



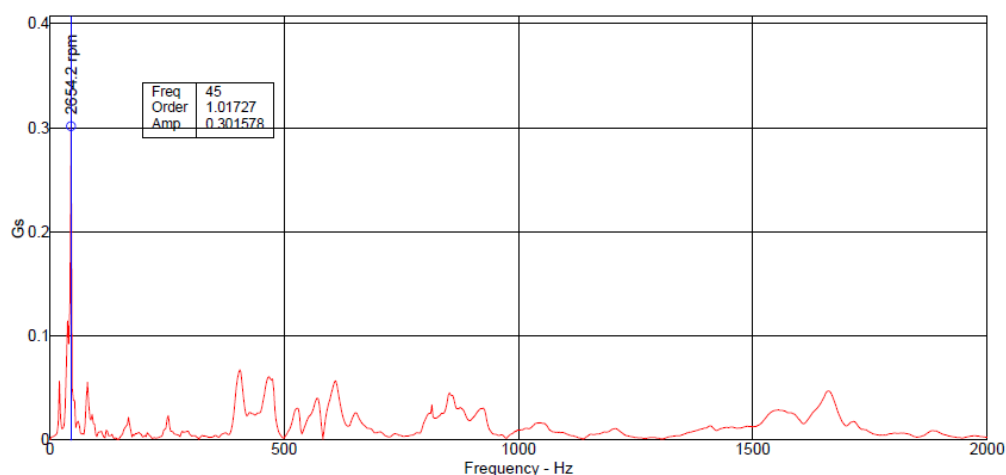
6.9. ábra A 2-es csapágy nylon kalapácsvéggel készített horizontális ütés impulzus jele



6.10. ábra A 2-es csapágy nylon kalapácsvéggel készített horizontális frekvencia spektruma



6.11. ábra A 2-es csapágy nylon kalapácsvéggel készített vertikális ütés impulzus jele



6.12. ábra A 2-es csapágy nylon kalapácsvéggel készített vertikális frekvencia spektruma

A „Bump” teszt mérési eredményeinek összefoglalását táblázatos formában készítettem el (6.2. táblázat), amely mérési helyek és irányok szerint foglalja össze a különféle kalapács fejek segítségével rögzített spektrumokból meghatározható sajátfrekvenciák értékeit.

| Mérési helyek,<br>irányok     | Rezonanciafrekvencia RPM -ben [1/min] |      |            |      |
|-------------------------------|---------------------------------------|------|------------|------|
|                               | Acél fej                              | [Hz] | Nylon fej  | [Hz] |
| 1-es csapágy,<br>horizontális | 2596 1/min                            | 43,3 | 2596 1/min | 43,3 |
| 1-es csapágy,<br>vertikális   | 2185 1/min                            | 36,4 | 2176 1/min | 36,3 |
| 2-es csapágy,<br>horizontális | 2599 1/min                            | 43,3 | 2510 1/min | 41,8 |
| 2-es csapágy,<br>vertikális   | 2650 1/min                            | 44,2 | 2654 1/min | 44,2 |

6.2. táblázat A "Bump" teszt mérési eredményeinek összefoglaló táblázata

### 6.3. Megállapítások a mérési eredmények alapján

**A kalapácsütés teszt eredményei alapján az alábbi megállapítások fogalmazhatók meg.**

- A kalapácsütés teszt alapján a horizontális irányban a rezonanciafrekvencia a merev láb esetén 2600 1/min, a vertikális irányban pedig átlagosan 2417 1/min értékkel bír. Ez a számított rezonanciafrekvenciához képest 14-16 %-os eltérést jelent.
- A számított értékektől való legkisebb eltérés (2176 1/min) az 1-es csapágy vertikális irányú, nylon kalapácsfejjel végzett mérés esetén tapasztalható. Ez az eltérés csak 4%-os.
- Mind az időjel, mind a frekvencia spektrum azt mutatja, hogy az acél és a nylon kalapácsfej alkalmazása esetén azonos sajátfrekvenciák, de eltérő erősségű amplitúdók tapasztalhatók. A nylon kalapácsfej alkalmazása minden mérés esetében körülbelül 10-szer akkora amplitúdót eredményezett, mint az acél fej esetében.
- Az érzékelő helyzete és az ütés iránya hatással van az eredményre.
- A mérések kivitelezése megfelelően sikerült, az eredmények összhangban vannak a számítással meghatározott sajátfrekvenciával, attól 5-15%-ban térnek el, amely megfelel a vezető amerikai cégek által publikált szakirodalmi értékeknek. Ezek alapján a kalapácsütés tesztek eredményei felhasználhatók az elemzésben.
- A mérések kiértékeléséhez és dokumentálásához az időjel és a frekvencia spektrum együttes rögzítésére és adatfeldolgozó szoftverre van szükség.

## 7. Következtetések a mérési eredmények, és a kiértékelés alapján

### 7.1. Következtetéses a rezgésspektrum és időjel analízis alapján

#### A spektrumanalízis alapján levont következtetések:

- A spektrum analízis alkalmazásával a gépszerkezet sajátfrekvenciája csak úgy határozható meg pontosan, ha előtte számítással, valamit a kalapácsütés teszt vagy a kifutás vizsgálat eredményei alapján tudjuk megállapítani a rezonancia fordulatszámot.
- Az előző következtetés maga után vonja, hogy rezonancia esetén a spektrumból ki tudjuk mutatni a rezonancia tényét, de ennél alacsonyabb, vagy magasabb fordulatszámon, ha a jelenség nem jelentkezik, akkor erre nincs lehetőség.
- A módszer előnye, hogy a rezonancia dokumentálásában kiválóan alkalmazható.
- A módszer hátránya, hogy a rezonanciafrekvenciából különböző fordulatszámon annál nehezebben tudjuk a rezonancia tényét megállapítani, minél messzebb vagyunk a szerkezet sajátfrekvencia tartományától.

#### Az időjel analízis alapján levont következtetések:

- A frekvencia spektrummal való összefüggése alapján arra a következtetésre jutottam, hogy önállóan ez a módszer csak nagyon egyértelmű esetben tudja a rezonancia tényét megvilágosítani.
- Jól használható viszont arra, hogy kétes esetben, amikor például kavitáció, vagy áramlási zaj okoz rezonanciához hasonló jelenséget a frekvencia spektrumokkal együtt el tudjuk különíteni a különféle hibákat és lehetőséget teremt a pontos diagnózis felállításához.

#### A fázisszög változás elemzése alapján levont következtetések:

- A kifutási vizsgálathoz hasonlóan, a fázisszög változás elemzése is alátámasztja a hajlító kritikus jelenlétét, mivel ezeknél a méréseknél az amplitúdó változás hasonlóképpen jelen van, mint az fázisszög változás.

- A módszer hátránya, hogy a spektrum és az időjel alak analízishez hasonlóan ez a vizsgálati eljárás sem alkalmazható önmagában, csak úgy határozható meg pontosan a rezonanciafrekvencia, ha előtte számítással, valamit a kalapácsütés teszt vagy a kifutás vizsgálat eredményei alapján tudjuk megállapítani.
- Előnye, hogy a rezonanciafrekvencia és a hajlító kritikus rendkívül szemléletes a dokumentálásában.

## 7.2. Következtetéses a kifutási vizsgálat alapján

- A kifutás teszt alkalmazásával a vizsgált gépszerkezet sajátfrekvenciái az elméletben számított értékhez képest átlagosan 10% eltérést mutat.
- Ez a mérési módszer önmagában a kalapácsütés tesztnél gyorsabban, egyszerűbb kiértékelési módszerrel mutatja meg a rezonancia vagy a sajátfrekvencia értékét.
- A méréshez speciális, de a kalapácsütés tesztnél olcsóbb műszerezettségre van szükség.
- A módszer előnye, hogy akkor is megtudjuk határozni a sajátfrekvencia értékét, ha a számítást a gép bonyolultsága miatt nem (vagy csak véges elemes módszerrel) tudjuk elvégezni.
- Hátránya, hogy csak akkor alkalmazható, ha a gép forgórészén lehetőségünk van a fordulatszám és a fázisreferencia mérésével való meghatározására.
- A mérések során azt tapasztaltam, hogy az ipari gyakorlat számára ez a módszer biztosítja a legegyszerűbb és leggyorsabb kiértékelési módszert a mérések elfogadható pontossága mellett.

## 7.3. Következtetések a „Bump” teszt alapján

- A kalapácsütés teszt segítségével egy gépszerkezet rezonanciafrekvenciái 5-15 %-os pontossággal kimutathatók.

- A mérés megfelelő kivitelezéséhez speciális mérőműszerre, szakszerű műszerbeállításra, a mérési pontok helyes kiválasztására van szükség, amely speciális szaktudást igényel.
- A módszer önmagában is képes a rezonanciafrekvenciák meghatározására, de a diagnózis érdekében célszerű a számítási vagy kifutási vizsgálati módszerrel együtt alkalmazni.

## Összefoglaló

A TDK dolgozatom témájául a megelőző karbantartás egyik leghatékonyabb módszerének, a rezgésdiagnosztikai vizsgálatának témakörét választottam. A gépek megbízható működésének megítélésében a rezgésdiagnosztikán belül is speciális problémának tekinthetők a rezonanciák vizsgálati módszerei. A rezonanciák károsító hatásai a gépek működése során sok esetben katasztrofális tönkremenetekhez vezetnek, ezért fontos tisztában lenni egy működő gép sajátfrekvenciájának nagyságával. Egyetemi tanulmányaim során felkeltették érdeklődésem azokat a diagnosztikai módszerek és műszerek, amelyek segítségével a rezonancia jelensége kimutatható és megakadályozható.

A dolgozatom első részében a rezonancia károsító hatásait ismertetem, amely során kitérek a rezonancia jelenségének a megengedhető rezgések szabványos értékeinek, valamint a gépágyazások rezgéstani problémáinak elemzésére. A második fejezetben a rezonancia kimutatására alkalmas módszereket foglaltam össze. Az egyetemen a frekvenciaspektrum elemzésre, az időjel analízis vizsgálatra, a kifutás vizsgálatra, valamint a kalapácsütés, vagy „Bump” teszt végrehajtására volt lehetősége. Ezen vizsgálatok végrehajtását egy rezgésdiagnosztikai próbapadon végeztem el, két rezgésmérési rendszer, a MICROLOG (SKF) és az Easy-Viber (VMI) rendszerek felhasználásával. Ezeknek a rendszereknek a működését a harmadik fejezetben ismertettem.

A rezonancia probléma vizsgálatára kísérleteket terveztem, melyek során az előzőekben bemutatott diagnosztikai módszerek gyakorlati alkalmazásán keresztül külön-külön minden módszerrel meghatároztam a VIBROTESTER próbapad „Laval-tengely” moduljának sajátfrekvenciáját, melyet összehasonlítottam elméleti számítások eredményeivel. Kísérleteim során a rezonancia jelenlétét minden mérés esetében sikerült megtalálni, a különféle tesztek szemléletesen igazolják a rezonanciák által létrehozott veszélyes rezgéseket. A mérési eredmények elemzése során kimutattam az egyes módszerek elméleti sajátfrekvenciától való eltérését és megállapítottam, hogy az alkalmazott módszerek az ipari gyakorlat számára megfelelő pontosságot biztosítanak a sajátfrekvenciák meghatározásához.

TDK dolgozatommal rámutattam az egyes módszerek gyakorlati alkalmazhatóságára, munkámat szeretném felajánlani az egyetemen folyó rezgésdiagnosztika oktatásban történő felhasználásra. Remélem, hogy a rezonancia vizsgálatok témakörében végzett kísérleteim és

elemzéseim hozzájárulnak ezen a speciális műszaki problémának az egyetemen történő oktatási színvonalának növeléséhez.

Szeretném megköszönni a konzulensemnek, Dr. Szabó József Zoltánnak a rengeteg elméleti tudást és gyakorlati tapasztalatot, melyeket a dolgozat megírása alatt nyújtott. Segítsége nélkül a dolgozatom nem érte volna el ezt a színvonalat.

## Summary

„Resonance of machines and structures may be identified in many ways including observation. Almost everyone has driven a car that had unbalanced tire on the front that at a certain speed the vibration would become very nice noticeable. Increasing or decreasing speed would reduce the vibration. The resonance of the front suspension was being excited to vibrate by the unbalanced force from the tire.” [2]

The topic of my TDK thesis is one of the most effective method of preventive maintenance, this is the vibration diagnostic analysis. Especially I dealt with the vibration diagnostic methods which suitable for the detection of the resonance phenomenon. In many cases the harmful effects of resonances lead to catastrophic failure in operation of the equipment and machinery, so it is important to know a working machine's magnitude of own frequency. During my university studies I started to be interested in the diagnostic methods and tools, which can help you to detect and prevent the resonance phenomenon.

In the first part of my thesis I present the harmful effects of resonance, in which I mention the permitted vibrations standard values of the resonance phenomenon, and the importance of the machines substantiation in vibration study aspects. In the second chapter applicable methods for the detection of resonance are summarized. At the university I had the opportunity to test frequency spectrum analysis, time signal analysis and impulse testing or another name „Bump” testing. The implementation of this diagnostic test was performed on a vibration test bench, using two vibration measurement system, the MICROLOG (SKF) and the Easy-Viber (VMI) systems. The operation of these systems are described in the third chapter.

For the investigation of resonance problem, experiments were planned, in which previously showed diagnostic methods are illustrated through practical application. I determined the own frequency of „Laval-axis” module of VIBROTESTER test bench separately with each method, which were compared with the results of theoretical calculations. During the analysis of the measurement results I showed the differences in some methods between the measured results and theoretical own frequencies, and found that these methods ensure appropriate precision in determination of own frequency for industrial practice.

My TDK thesis pointed out the practical applicability of each method. I would like to offer my work for the university education about vibration diagnostics. I hope that my experiments

and analyzes carried out on the topic of special resonance studies will contribute to increase the level of education of the university of this technical problem.

## **KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS**

Ez a szakdolgozat a TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások projekt keretein belül készült. „A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.”

## **ACKNOWLEDGMENT**

This article were made within the project TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 „Critical infrastructure protection research”. „The project is implemented with the support of the European Union, partially financed by the European Social Fund”.

## Irodalomjegyzék

- 1) Dr. Dömötör Ferenc: A rezgésdiagnosztika elemei, SKF Svéd Golyóscsapágy Rt., Budaörs, 1996
- 2) Liposzy György- Sólyomvári Károly- Varga Gábor: Gépek rezgésvizsgálata és karbantartása, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981
- 3) Makhult Mihály: Gépágyazások rezgéstani méretezése, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1974
- 4) Dr. Kégl Tibor- Szabó József Zoltán: Műszaki diagnosztika, Budapesti Műszaki Főiskola Bánki Donát Gépészmérnöki Főiskolai Kar Mérnökpedagógiai Intézet, Budapest, 2003
- 5) [http://www.aastadium.hu/Feltoltes/szakcikk/Gepalapok\\_hibainak\\_kimutatasa\\_rezgesvizsgalattal.pdf](http://www.aastadium.hu/Feltoltes/szakcikk/Gepalapok_hibainak_kimutatasa_rezgesvizsgalattal.pdf) 2013-09-28
- 6) <http://spectronics.hu/rezonancia-vizsgalat> 2013-09-28 2013-09-28
- 7) [ftp://witch.pmmf.hu:2001/Tanszeki\\_anyagok/Epuletgepeszeti%20Tanszek/cimbi/rezg%E9sgyak/2003-06\\_farkas.pdf](ftp://witch.pmmf.hu:2001/Tanszeki_anyagok/Epuletgepeszeti%20Tanszek/cimbi/rezg%E9sgyak/2003-06_farkas.pdf) 2013-10-08
- 8) <http://www.rezgesanalizis.hu/index.htm> 2013-10-14
- 9) <http://www.pim-kft.hu/szakmai-anyagok> 2013-11-11
- 10) Szabó József Zoltán: Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok és haditechnikai alkalmazhatóságuk kutatása Phd doktori értekezés Zrinyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Budapest, 2010
- 11) Vibshape Manual Használati utasítás, EasyViber 64 Felhasználói kézikönyv VMI AB, Norrköping, 2002
- 12) MICROLOG CMVA60 Adatgyűjtő Használati utasítás, Gyakorlati segédlet SKF Condition Monitoring Inc. Hungarian Translation 2002 SKF Svéd Golyóscsapágy Zrt.

13) Technical Associates of Charlotte, P.C.: Advanced Vibration Detection and Correction Techniques, 2012

CHAP 05 Resonance Identification 10-01-2012.docx

## Hivatkozásjegyzék

- [1] <http://www.gepszakerto.hu/szakma-magyar.htm> „Műszaki diagnosztika” cikksorozat  
2013-11-11
- [2] Technical Associates of Charlotte, P.C.: Advanced Vibration Detection and Correction Techniques, 2012  
CHAP 05 Resonance Identification 10-01-2012.docx

## Képtár

- 1.1. ábra: Makhult Mihály: Gépágyazások rezgéstani méretezése, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1974 (p.19.)
- 1.2. ábra: Makhult Mihály: Gépágyazások rezgéstani méretezése, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1974 (p.19.)
- 1.3. ábra: Makhult Mihály: Gépágyazások rezgéstani méretezése, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1974 (p.20.)
- 1.4. ábra: Makhult Mihály: Gépágyazások rezgéstani méretezése, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1974 (p.24.)
- 2.1. ábra: Szabó József Zoltán: Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok és haditechnikai alkalmazhatóságuk kutatása, Budapest, 2010 (p.38.)
- 2.2. ábra: Dr. Nagy István: Állapotfüggő karbantartás Műszaki diagnosztika I., Delta-3N Kft., 2006 (p.66.)

- 2.6. ábra: Szabó József Zoltán: Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok és haditechnikai alkalmazhatóságuk kutatása, Budapest, 2010 (p.71.)
- 3.5. ábra: Szabó József Zoltán: Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok és haditechnikai alkalmazhatóságuk kutatása, Budapest, 2010 (p.67.)
- 3.6. ábra: <http://www.ddc-rostock.de/42.0.html> 2013-11-11